
UNIVERSIDAD CARLOS III DE
MADRID
Departamento de Mecánica de Medios
Continuos y Teoría de Estructuras



Ingeniería Técnica Industrial Mecánica
Proyecto Fin de Carrera

*Estudio frente a impacto de estructuras
tubulares metálicas en ensayos dinámicos
de flexión en tres puntos*

Alumno:

Mario Sánchez Díaz

Tutor:

Álvaro Vaz-Romero Santero

Marzo 2015

Página en blanco intencionadamente

Agredecimientos

Este proyecto fin de carrera significa ponerle fin a una etapa de mi vida, y me gustaria agradecer a toda la gente que ha estado a mi lado el apoyo recibido durante todo este tiempo.

En primer lugar quiero darles las gracias a mis amigos y compañeros de universidad, sin los cuales sé que no habría llegado donde estoy hoy en día. Parece mentira el peso que algunas personas pueden tener en tu vida.

También queria darle las gracias a mi familia, que ha sabido (o intentado) soportarme en los malos momentos y compartir conmigo los buenos.

Mención especial merece mi tutor, Álvaro, cuya paciencia, ayuda y dedicación han hecho posible la realización del presente proyecto.

Gracias a todos, de todo corazón.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estructura del documento	3
2. Estado del arte	4
2.1. Introducción	4
2.2. Crashworthiness y energía absorbida	4
2.3. Antecedentes	6
2.3.1. Modos de deformación de tubo	8
2.3.1.1. Inversión	8
2.3.1.2. División	8
2.3.1.3. Aplastamiento lateral de tubos	9
2.3.1.4. Aplastamiento axial de tubos	10
2.4. Ensayo de flexión en tres puntos	13
3. Material	18
3.1. Introducción	18
3.2. Tendencia en la industria del aluminio	19
3.3. El aluminio como metal ligero	23
3.3.1. Abundancia relativa	25
3.4. Producción de aluminio	26
3.5. Especificaciones de aluminio	28
3.6. Tratamientos Térmicos	29
3.6.1. Aleaciones de aluminio forjado	32

3.7.	Aleaciones de fundición de aluminio	37
3.8.	Aleación de aluminio 6082-T6	41
4.	Análisis experimental	43
4.1.	Descripción de la máquina	43
4.1.1.	Descripción general	43
4.1.2.	Estructura principal	44
4.1.3.	Soporte para probetas	45
4.1.4.	Lanzador	46
4.1.4.1.	Cilindro acumulador	47
4.1.4.2.	Bridas delantera y trasera	48
4.1.4.3.	Placa de impulsión y empujador	48
4.2.	Sistema de frenado.	49
4.2.1.	Conjunto impactador	50
4.2.1.1.	Medición de la aceleración	51
4.2.2.	Sistema de medida de velocidad	51
4.2.3.	Sistema de control	52
4.3.	Ensayos experimentales	54
4.3.1.	Geometría de la probeta	54
4.3.2.	Disposición experimental	54
4.3.3.	Selección de los parámetros del ensayo	55
5.	Vídeo Tracking	57
5.1.	Introducción	57
5.2.	Software empleado	57
5.3.	Análisis	58
5.3.1.	Definición de los parámetros de Tracker	58
6.	Modelo numérico	61
6.1.	Introducción	61
6.2.	Ecuaciones constitutivas	61
6.3.	Modelado en Abaqus	63
6.3.1.	Partes	63
6.3.1.1.	Tubo	63
6.3.1.2.	Apoyos	65
6.3.1.3.	Impactador	66
6.3.2.	Material	67
6.3.3.	Consideraciones adicionales del modelo numérico	67
6.3.4.	Ensamblaje	68
7.	Análisis de los resultados	69
7.1.	Introducción	69

7.2. Evolución de la aceleración del impactador	69
7.3. Evolución de la velocidad del impactador	71
7.3.1. Tensión	73
7.4. Deformación	78
7.5. Energía absorbida	83
7.6. Desplazamiento	85
8. Conclusiones	89
9. Trabajos futuros	90

Índice de figuras

2.1. Barras frontales de un vehículo como sistema de absorción de energía (Lima et al., 2011).	5
2.2. Estructura inferior de un helicóptero como sistema de absorción de energía (Lima et al., 2011).	6
2.3. Inversion de tubo de dentro hacia fuera debida a carga axial (Alghamdi, 2001).	8
2.4. División de tubo debido al efecto de una carga axial (Alghamdi, 2001). . .	9
2.5. Aplastamiento lateral entre dos planchas paralelas (Wu and Carney, 1997). .	10
2.6. Aplastamiento axial progresivo de un elemento de abosrción de energía (Alghamdi, 2001).	11
2.7. Esquema de un ensayo de flexión en tres puntos (Barthelat and Lobo). . .	13
2.8. Mecanismo de rótula típico	15
2.9. Mecanismo de rótula teórico (Kecman, 1983).	16
3.1. Producción global de Bauxita en 1972 y 2010 (Nappi, 2013).	19
3.3. Sectores de uso final de aluminio (Nappi, 2013).	20
3.2. Consumo global de aluminio primario en 1972 y 2010 (Nappi, 2013).	20
3.4. Ritmo de crecimiento del consumo de aluminio primario (Nappi, 2013). . .	21
3.5. Efecto de la mejora de las propiedades del aluminio en función del peso estructural	23
3.6. Relación resistencia-densidad para aleaciones ligeras	24
3.7. Pesos comparativos de diferentes metales	25
3.8. Cuba electrolítica	27
3.9. Gráficas de recocido de aluminio (Obando and Sánchez, 2014).	30
3.10. Gráficas de envejecimiento de aluminio (Obando and Sánchez, 2014). . . .	32

3.11. Esquema del método de enfriamiento directo (William, 1998).	33
3.12. Lingote fundido de manera semicontinua	34
3.13. Laminador de aluminio	34
3.14. Esquema de un tren de laminado	35
3.15. Pasos en la construcción de un molde sencillo de arena para hacer un va- ciado en arena	37
3.16. Molde permanente o coquilla para fundición.	38
3.17. Coquilla para la fundición simultánea de dos pistones.	39
3.18. Gráfico tratamiento térmico T6 (Obando and Sánchez, 2014).	42
4.1. Descripción de los diferentes subsistemas que consta el sistema de ensayo. .	44
4.2. Descripción estructura principal del lanzador neumático.	45
4.3. Soporte para especímenes de ensayo.	46
4.4. Actuador neumático.	46
4.5. Esquema básico interno del lanzador.	47
4.6. Detalle placa impulsión y empujador de la barra porta impactadores. . . .	48
4.7. Detalle del freno neumático y de la localización del sensor láser.	49
4.8. Conjunto impactador.	50
4.9. Detalle del cable del acelerómetro instalado en la cabeza del impactador. .	51
4.10. Subsistema de medida de velocidad.	52
4.11. Armario de control.	53
4.12. Dimensión de la sección transversal de los tubos de aluminio.	54
4.13. Esquema del ensayo dinámico de flexión en tres puntos.	55
4.14. Configuración del peso del impactador para los ensayos de flexión dinámica en tres puntos.	55
4.15. Momento en que el impactador golpea el tubo durante el ensayo dinámico de flexión en tres puntos.	56
5.1. Diferentes puntos elegidos como referencias para el rastreo con Tracker. . .	59
5.2. Ejes y distancia de referencia.	60
5.3. Trayectoria seguida por el impactador y aceleración mostrada por Tracker .	60
6.1. Detalle del modelado del tubo en Abaqus.	63
6.2. Detalle del mallado del tubo en Abaqus.	64
6.3. Detalle del modelado del apoyo en Abaqus.	65
6.4. Detalle del mallado del apoyo en Abaqus.	65
6.5. Detalle del modelado del impactador.	66
6.6. Detalle del mallado del impactador en Abaqus.	66
6.7. Detalle del ensamblaje final del modelo de Abaqus.	68
7.1. Gráficas de aceleración del impactador durante ensayo de flexión dinámica en tres puntos.	70

7.2. Evolución de la velocidad del impactador durante el ensayo de flexión dinámica en tres puntos.	72
7.3. Tensiones de Von Mises: vista general	73
7.4. Tensiones de Von Mises: corte longitudinal	74
7.5. Tensiones de Von Mises: corte transversal	75
7.6. Tensiones de Von Mises: cara superior	76
7.7. Tensiones de Von Mises: cara inferior	77
7.8. Deformaciones plásticas equivalentes: vista general	78
7.9. Deformaciones plásticas equivalentes: corte longitudinal	79
7.10. Deformaciones plásticas equivalentes: corte transversal	80
7.11. Deformaciones plásticas equivalentes: cara superior	81
7.12. Deformaciones plásticas equivalentes: cara inferior	82
7.13. Comparación de la deformación entre el ensayo experimental y el modelo numérico ($V_0 = 8m/s$). - Vista lateral	83
7.14. Comparación de la deformación entre el ensayo experimental y el modelo numérico ($V_0 = 8m/s$). - Vista superior	83
7.15. Energía cinética obtenida a través del análisis de vídeo.	84
7.16. Energía cinética obtenida a través del modelo numérico.	84
7.17. Contorno de desplazamientos en el caso $V_0 = 8m/s$	85
7.18. Detalle del contorno de los desplazamientos.	86
7.19. Medición de la flecha de desplazamiento.	87
7.20. Detalle de las mediciones de los tubos.	87

Abstract

El presente proyecto fin de carrera pretende estudiar el comportamiento frente a impacto de un tubo de sección cuadrada fabricado en aluminio 6082-T6 mediante un ensayo de flexión dinámica en tres puntos. En primer lugar, se han realizado dos ensayos experimentales a dos velocidades distintas, 6 y 8 m/s. Ambos ensayos fueron grabados utilizando una cámara de alta velocidad. A continuación se ha utilizado la herramienta de análisis de vídeo Tracker para poder extraer datos del ensayo y poder compararlos con los resultados de los ensayos experimentales. Además de la metodología descrita, se ha desarrollado un modelo numérico usando el software de elementos finitos ABAQUS/Explicit capaz de reproducir el comportamiento del material del tubo. El modelo ha servido para calcular balances de energía que han permitido calcular la cantidad de energía cinética que ha sido absorbida por el material en forma de deformación plástica.

1.1. Motivación

El colapso de estructuras de pared delgada siempre ha recibido atención debido a su utilidad para aplicaciones de absorción de energía en caso de impacto. Cuando estas estructuras colapsan bajo cargas dinámicas, los desplazamientos se acompañan generalmente por deformaciones plásticas locales.

El fallo o colapso por flexión de estructuras de pared delgada es un caso importante de fallo estructural. Se diferencia del fallo axial porque, mientras que en el caso del fallo axial la deformación (aunque localizada en todo momento) se propaga a lo largo de dicha estructura; en la flexión del tubo la deformación por flexión se concentra en mayor medida en una región localizada de la estructura que se deforma progresivamente.

Antiguamente, el diseño de estructuras que pudieran absorber la fuerza de un impacto determinado se realizaba de forma empírica, es decir, mediante pruebas de impacto reales con impactadores y blancos específicos. A través de un estudio estadístico, estos resultados puramente experimentales permitían establecer curvas de probabilidad que permitían predecir el comportamiento de una estructura en función de una serie de variables.

Si bien es cierto que las conclusiones que se pueden obtener a través de este método son fiables, los resultados sólo son válidos con los parámetros probados en el experimento, siendo difícilmente extrapolables. Cualquier variación en la velocidad del impacto o en la geometría del tubo invalida los de la prueba. Es también un método costoso, ya que los ensayos experimentales requieren instalaciones adecuadas y equipos sofisticados, siendo un coste directamente proporcional a la precisión requerida.

Con el fin de disminuir el gasto derivado de la experimentación, se desarrollaron una serie de herramientas semi-empíricas que permiten extender la validez de las mismas a

otras estructuras. Estas se basan en ecuaciones con base teórica que, calibradas con una serie de datos experimentales, permiten cierta interpolación e, incluso, extrapolación de resultados.

Durante los últimos años se han desarrollado un gran número de modelos para simular este proceso, todos ellos pertenecientes a dos categorías: modelos analíticos y simulación numérica. Gracias a ellos, los test experimentales sólo son necesarios en la última fase del proceso de diseño, pudiendo utilizarse estas herramientas en el resto de fases.

En el modelo analítico, también conocido como modelo de ingeniería, se asumen una serie de hipótesis simplificadas para recrear el comportamiento de la estructura, consiguiendo resolver el problema tratado en cuestión de minutos utilizando ecuaciones relativamente sencillas.

El método de simulación numérica se basa en la utilización de técnicas de discretización del continuo, como por ejemplo elementos finitos. Estos métodos llegan a la solución del problema resolviendo ecuaciones diferenciales parciales que definen el problema, expresadas en forma débil o integral. La principal ventaja es que permite resolver problemas en los que es difícil encontrar una solución analítica. Sin embargo, dependen en gran medida de las ecuaciones constitutivas usadas para definir las propiedades de los materiales involucrados en la simulación.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este proyecto fin de carrera es estudiar el comportamiento de una estructura tubular de aluminio cuando se somete a un ensayo dinámico de flexión en tres puntos.

Para ello se han marcado los siguientes objetivos específicos:

- Obtener datos experimentales de un ensayo de flexión dinámica en tres puntos en el laboratorio.
- Desarrollar una metodología experimental para obtener datos adicionales mediante un sistema de seguimiento de puntos con cámara de alta velocidad.
- Desarrollar un modelo numérico, a partir del programa de elementos finitos ABAQUS/Explicit, que sea capaz de reproducir el comportamiento del tubo durante un ensayo dinámico de flexión en tres puntos.
- Comparar los resultados obtenidos en el ensayo con los datos obtenidos usando Tracker y con los del modelo numérico.

1.3. Estructura del documento

Se ha considerado oportuno describir cada uno de los apartados en los que se ha dividido el proyecto para que el lector pueda tener una idea general de los mismos. Dichos apartados son:

1. Introducción.
2. Estado del arte: en este apartado se muestran los tipos de elementos más utilizados como elementos de absorción de energía y los modos de deformación más comunes, detallando el ensayo de flexión dinámica en tres puntos y las características del problema a resolver. También se menciona brevemente el uso de modelos analíticos para estudiar este tipo de problema.
3. Material: en este apartado se describen los distintos procesos de fabricación de aluminio, las propiedades de sus diferentes aleaciones y las tendencias actuales en la industria del mismo.
4. Análisis experimental: en este apartado se describe el ensayo de laboratorio llevado a cabo, la maquinaria utilizada y se muestran los resultados obtenidos.
5. Vídeo Tracking: en este apartado se explican las propiedades del programa de análisis de vídeo Tracker y se muestran los datos obtenidos a partir de una grabación del ensayo.
6. Modelo numérico: en este apartado se explica el proceso seguido para desarrollar el modelo numérico. También se detallan las ecuaciones constitutivas utilizadas y el criterio de fallo empleado.
7. Análisis de los resultados: en este apartado se analizan y comentan los principales resultados extraídos de los capítulos anteriores.
8. Conclusiones.
9. Trabajos futuros.

2.1. Introducción

Durante los últimos años hemos visto cómo ha aumentado la importancia que se le da al diseño de componentes y estructuras con el fin de minimizar el daño en humanos. Ya sea el caso de un vehículo o una estructura, podemos estar seguros de que siempre puede hacerse algo más para reducir el daño potencial de un impacto.

La tendencia actual es la producción de estructuras cada vez más ligeras, lo que requiere un trabajo mayor en la fase de diseño. Esto es debido a que ciertos aspectos del diseño se vuelven más críticos conforme el peso del material disminuye y las tensiones de trabajo son cada vez más cercanas a la resistencia última del material. Entre estos materiales se incluyen plásticos, materiales compuestos, aluminio, magnesio y nuevos tipos de aceros de gran resistencia.

En el caso de estos materiales, tanto los que tienen una resistencia y ductilidad reducidas como los que pueden ser usados en aplicaciones con cargas pesadas, presentan una alta probabilidad de rotura durante una colisión.

El hecho de que el impacto de un vehículo sea algo tan habitual ha llevado a que cada vez se tenga más en cuenta la capacidad para soportar colisiones durante la fase de diseño de un vehículo.

2.2. Crashworthiness y energía absorbida

Se denomina *Crashworthiness* a la capacidad de una estructura para proteger a sus ocupantes en caso de impacto. Dependiendo de la naturaleza del impacto y el vehículo

implicado, se utilizan diferentes criterios para determinar la resistencia al impacto de dicha estructura. Estas comprobaciones son de gran relevancia para el campo de la ingeniería estructural y de materiales, y su objetivo es diseñar estructuras capaces de absorber energía para evitar o paliar los daños en el sistema que intentan preservar.

La energía absorbida por el sistema es aquella energía cinética que se convierte, ya sea parcial o totalmente, en otra forma de energía. Esta energía convertida puede ser reversible, como energía de presión en fluidos compresibles y energía de deformación elástica en sólidos, o irreversible, como energía de deformación plástica. La energía disipada en la deformación plástica de un sistema de absorción de energía metálico será el objeto de estudio de este proyecto.

Cuando se diseña un elemento de absorción de energía colapsable, se hace de modo que sea capaz de absorber la mayor parte de la energía cinética del impacto dentro del propio sistema y de forma irreversible, asegurándose de esta manera que las lesiones en humanos y los daños en la carga transportada sean mínimos. Cuando ocurre un accidente, se puede apreciar cómo deformaciones tales como la de flexión, torsión o aplastamiento se concentran en la estructura del vehículo, consiguiendo que la energía que se transmite a los ocupantes sea mínima.



Figura 2.1: Barras frontales de un vehículo como sistema de absorción de energía (Lima et al., 2011).

Los elementos estructurales clave y los bastidores de la mayoría de medios de transporte (ya sea por tierra, mar o aire) se diseñan como estructuras de pared delgada. (Lima

et al., 2011).

Los tubos de pared delgada hechos de materiales dúctiles se han utilizado como elementos de absorción de energía en distintas aplicaciones industriales de crashworthiness, especialmente en el campo de la automoción, con objeto de proteger a los ocupantes o la carga transportada. En el caso de una colisión frontal, uno de los más comunes de impacto, las barras frontales (Figura 2.1) representan el principal componente deformable diseñado para disipar la energía cinética del vehículo de forma estable y controlada.

Otro ejemplo de un elemento de absorción de energía son las barras tubulares de la estructura inferior de un helicóptero (Figura 2.2)

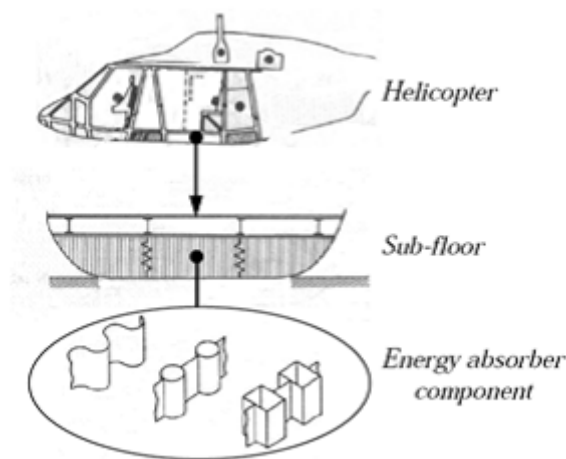


Figura 2.2: Estructura inferior de un helicóptero como sistema de absorción de energía (Lima et al., 2011).

Uno de los elementos dúctiles más utilizados como sistemas de absorción de energía en automóviles son las extrusiones de aluminio, tanto por el hecho de que el ahorro en peso llegue a ser del 25 % si lo comparamos con el del acero (Qiao et al., 2006) como sus propiedades de resistencia a la corrosión o su gran capacidad de absorción de energía. En capítulos posteriores se explicará con más detalle.

2.3. Antecedentes

Durante la segunda parte del siglo XX se investigaron un gran número de problemas de impacto, especialmente en el campo de la respuesta dinámica de estructuras en régimen plástico. Esto contribuyó a un mejor entendimiento de los modos de fallo y los patrones

de disipación de energía de dichas estructuras cuando son sometidas a impacto. Existen multitud de aplicaciones para su uso en una gran variedad de situaciones, como puede ser la resistencia a colisiones de vehículos (coches, ascensores, aviones, barcos...), barreras protectoras o quitamiedos, puentes y estructuras marítimas o tanques de almacenamiento. (Alghamdi, 2001)

Muchos artículos relevantes para este campo de estudio fueron presentados en el *1st International Symposium on Structural Crashworthiness* que tuvo lugar en Liverpool en Septiembre del 1983. Desde entonces, avances en la investigación en ese campo fueron presentados en ediciones especiales del *International Journal of Mechanical Science*, el *International Journal of Impact Engineering* y en libros como *Crashworthiness of Vehicles* (Johnson and Mamalis, 1978), *Structural Crashworthiness* (Jones and Wierzbicki, 1983), *Structural Impact and Crashworthiness* (G.A.O. and J., 1978), *Metal Forming and Impact Mechanics* (Reid, 1985), *Structural Impact* (Jones, 1989), y *Structural Crashworthiness and Failure* (Jones and Wierzbicki, 2010).

Desde entonces se han estudiado diferentes elementos de absorción de energía, como son anillos tubulares (S.R. et al., 1984), tubos circulares (Tanabe et al., 1995), columnas con múltiples esquinas (Liu, 2008; Ciubotariu, 2013), tubos ondulados (Singace and El-Sobky, 1997), troncos cónicos o piramidales (Mamalis and Johnson, 1983; Hou, 2013), estructuras de panal de abeja (Wierzbicki, 1983; Yin et al., 2011; Li et al., 2013; Paz et al., 2014), estructuras tipo sándwich (Yu et al., 2008; Tarlochan), y estructuras con geometrías especiales tales como perfiles en (Rhodes and Harvey, 1971) o barras de carga en forma de S (Zhou et al., 2011).

De todos estos elementos, los tubos de pared delgada representan los elementos estructurales más extendidos debido a la gran cantidad de elementos estructurales con dicha forma. La energía plástica puede ser disipada usando estos tubos a través de diferentes modos de deformación, vamos a destacar los siguientes (Alghamdi, 2001):

- Inversión
- División
- Aplastamiento lateral
- Aplastamiento axial

2.3.1. Modos de deformación de tubo

2.3.1.1. Inversión

Una de los modos de deformación más interesantes es la inversión de tubo que, básicamente, implica dar la vuelta, ya sea de dentro hacia fuera, o de fuera hacia dentro, de un tubo de sección circular hecho de un material dúctil, como se muestra en la figura 2.3.

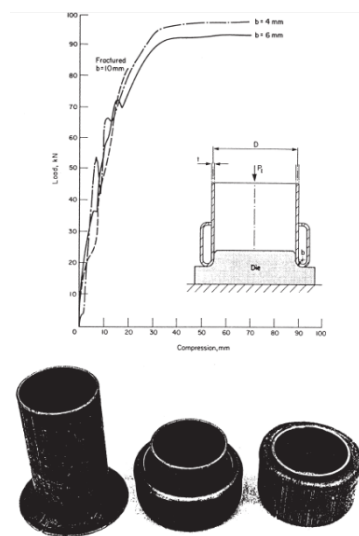


Figura 2.3: Inversion de tubo de dentro hacia fuera debida a carga axial (Alghamdi, 2001).

La mayor ventaja de este modo de deformación es la obtención, para el caso de un tubo uniforme, de la constante de inversión bajo carga. Este método fue presentado por General motors en 1969 (Al-Hassani et al., 1972). Hay que tener en cuenta que la inversión de tubo está altamente limitada por el radio de la matriz. Si el radio es pequeño se producirá un aplastamiento progresivo del tubo, mientras que si el radio es mayor que un cierto valor límite, se producirá la división del tubo.

2.3.1.2. División

El modo de deformación por división del tubo es un caso particular de la inversión de tubo, donde el radio de la matriz es lo suficientemente grande para producir su división en lugar de inversión. La energía absorbida se disipa al rasgar el metal del tubo en tiras. Stronge et al. examinaron el efecto de la división de tubo en tubos de sección cuadrada, identificando dos modelos, uno con inversión y otro sin ella (Stronge et al., 1983). Otros

ejemplos de estudios llevados a cabo son los de (Reddy and Reid, 1986; Atkins, 1988; Lu et al., 1994).

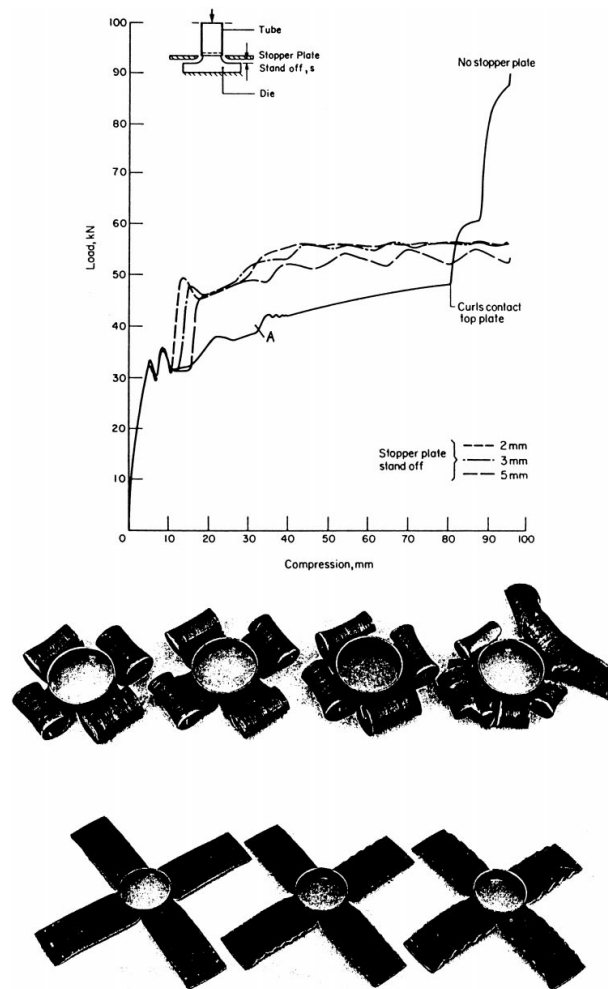


Figura 2.4: División de tubo debido al efecto de una carga axial (Alghamdi, 2001).

2.3.1.3. Aplastamiento lateral de tubos

Jonhson et al (Johnson et al., 1977) estudiaron el comportamiento de tubos cruzados sometidos a una carga lateral. Reddy y Reid investigaron la compresión lateral de tubos con coacciones laterales y descubrieron que la energía absorbida en un sistema con restricciones es tres mayor que la de un sistema libre (Reddy and Reid, 1979).

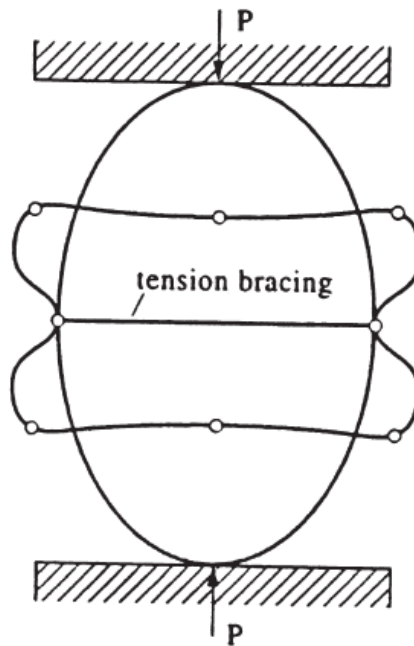


Figura 2.5: Aplastamiento lateral entre dos planchas paralelas (Wu and Carney, 1997).

Varios investigadores estudiaron el aplastamiento de tubos arriostrados (con sujeciones laterales) entre placas planas, incluyéndose entre ellos (Johnson et al., 1977; Reid et al., 1983; Carney and Pothen, 1988). Reid et al. mostraron cómo se daba un incremento en la absorción de energía para un ángulo de arriostramiento de 15° (Reid et al., 1983). Wu y Carney investigaron el colapso inicial de tubos elípticos arriostrados (Wu and Carney, 1997) y concluyeron que si se coloca la carga a lo largo del eje principal se incrementaba la energía disipada (ver figura 2.5). En otro artículo Wu y Canet compararon sus resultados experimentales con predicciones de elementos finitos usando el software de elementos finitos ABAQUS (Wu and Carney, 1998).

2.3.1.4. Aplastamiento axial de tubos

El pandeo de tubos debido a cargas axiales es un problema clásico de la mecánica de sólidos. Desde el punto de vista de la absorción de energía, se ha comprobado que los tubos circulares sometidos a compresión axial conforman uno de los mejores elementos para dicho fin (Alghamdi, 2001).

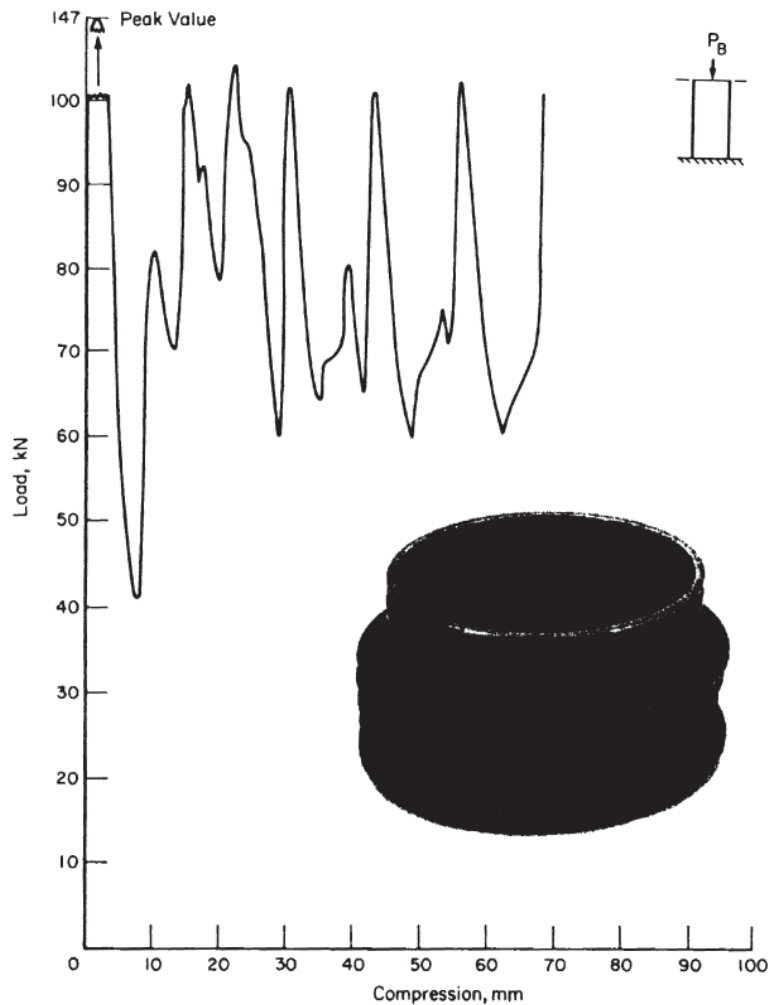


Figura 2.6: Aplastamiento axial progresivo de un elemento de absorción de energía (Alghamdi, 2001).

En el estudio de estructuras sometidas a colapso por compresión, la elasticidad del material es poco importante debido a las amplias deformaciones plásticas. Por ello, los efectos elásticos se desprecian cuando el valor de la energía plástica disipada en la estructura es tres veces mayor que la energía elástica de deformación. Además, el pandeo inicial de estos elementos es menos importante, desde el punto de vista de la energía, que el comportamiento post-pandeo (fluencia) que se asocia con largas deformaciones y desviaciones. Este comportamiento, a menudo, se estudia asumiendo un modelo rígido-plástico, dado que la energía absorbida en la deformación elástica es normalmente despreciable.

Abramowicz y Jones (Abramowicz and Jones, 1997) estudiaron la transición de tubos aplastados axialmente del modelo de flexión global al modelo de aplastamiento progresivo

en condiciones de carga estática y dinámica. Los autores vieron que el punto de transición depende de la longitud del tubo, la sección transversal, el endurecimiento por deformación, velocidad de deformación y las condiciones finales. Llegaron a la conclusión de que el aplastamiento global no tiene por qué coincidir con la máxima capacidad de carga del tubo.

El comportamiento de tubos de pared delgada de tubos de sección circular y cuadrada ha sido de gran interés desde el trabajo de Pugsley y Macaulay (Pugsley and Macaulay, 1960) y de Alexander (Alexander, 1960).

Mamalis y Johnson (Mamalis and Johnson, 1983) investigaron el aplastamiento de tubos de aluminio en condiciones cuasi-estáticas. Su objetivo principal, entre otros, fue determinar los detalles experimentales del modelo de fallo. Consiguieron hacer coincidir ecuaciones empíricas sus resultados experimentales.

Poco tiempo después, Mamalis et al. repitieron el mismo experimento usando diferentes materiales (acero al carbono) a velocidades de deformación más elevadas (2,5 m/min) (Mamalis et al., 1984). Los resultados obtenidos fueron también expresados de forma empírica.

Es interesante mencionar los estudios que llevaron a cabo Langseth et al (Langseth et al., 1998, 1999), en los que estudiaron el comportamiento de tubos de aluminio bajo condiciones de carga axial, tanto de forma cuasiestática como dinámica, y consiguieron validar el modulo numérico que reproducía dichos ensayos. Una vez validado, se sirvieron de dicho modelo para realizar un estudio paramétrico en el que comprobaron que la carga media era directamente proporcional a la velocidad de impacto y que la proporción de masa entre la del proyectil y el tubo no tenía una influencia significativa cuando su valor era superior a 15.

2.4. Ensayo de flexión en tres puntos

El ensayo de flexión en tres puntos es ampliamente utilizado para caracterizar el comportamiento mecánico de materiales (Barthelat and Lobo). En rasgos generales, consiste en la aplicación cuasiestática o dinámica de un desplazamiento en el centro, registrando el esfuerzo requerido durante la deformación del material.

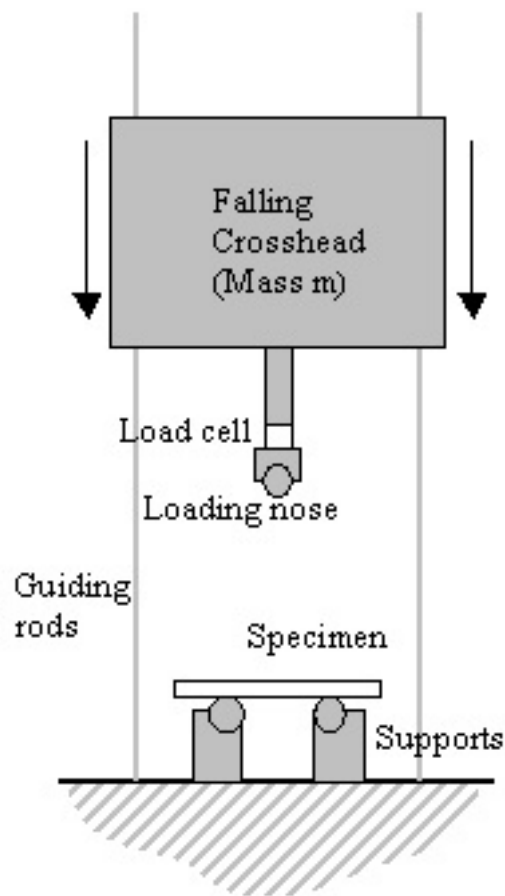


Figura 2.7: Esquema de un ensayo de flexión en tres puntos (Barthelat and Lobo).

Durante las últimas décadas, se han llevado a cabo multitud de investigaciones sobre el comportamiento a compresión axial de tubos de pared delgada para aumentar su capacidad de absorción de energía (Guo et al., 2010). Sin embargo, un estudio llevado a cabo por Kallina et al (Kallina et al., 1995) de las colisiones que se dan en situaciones reales, a diferencia de las que ocurren en un laboratorio de ensayos, mostró que el 90 % de los elementos estructurales involucrados colapsaron según el modo de fallo por flexión.

Thornton fue uno de los primeros en analizar el fallo a flexión (Thornton, 1979). Vio que la resistencia a tracción del tubo era el parámetro más significativo del material. Comprobó que en el caso de fallo por flexión la efectividad estructural depende en parte de las dimensiones del tubo y no solamente de la densidad relativa, a diferencia del colapso por compresión axial.

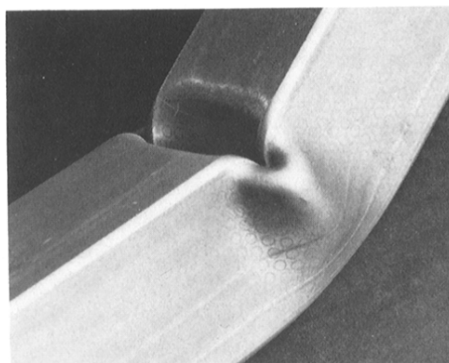
Kecman realizó el primer estudio completo del comportamiento a flexión de columnas prismáticas (Kecman, 1983) basándose en la formación y evolución de la rótula o articulación plástica que se produce al someter al tubo a flexión (en la figura 2.8 se puede ver mecanismo de rótula típico que se produce doblando un tubo de sección cuadrada).

Kecman observó que la rótula plástica presenta cuatro fases en el desarrollo:

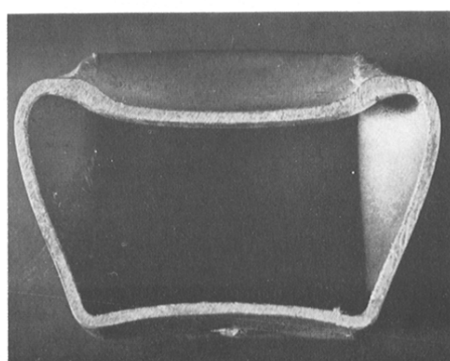
- a) Fase inicial: aparece una protuberancia (Figura 2.9 (b), silueta 1) en la zona sometida a compresión, pero sin unas líneas de giro definidas. Esta fase se da para ángulos de rótula desde cero hasta $5-10^\circ$, con valores mayores para paredes esbeltas.
- b) Segunda fase: continuando el giro descrito anteriormente, la sección toma la forma que se aprecia en la silueta 2 de la figura 2.9 (b). El ángulo θ varía desde $5-10^\circ$ hasta $25-35^\circ$.
- c) Tercera fase: Se inicia cuando la rótula se bloquea y toma la forma que se aprecia en la silueta 2 de la figura 2.9 (b), con las líneas de flexión AT y TK y sus contrapartes simétricas.
- d) Cuarta fase: se inicia cuando las dos mitades de la cara superior (la sometida a flexión) entran en contacto. Ésto bloquea la rótula plástica original y crea una segunda rótula adyacente.

No hay una transición clara entre fases, por lo que se puede hablar de formas intermedias híbridas. El mecanismo de fallo en secciones rectangulares muestra el mismo comportamiento, con una longitud de rótula igual al menor de los lados de la sección.

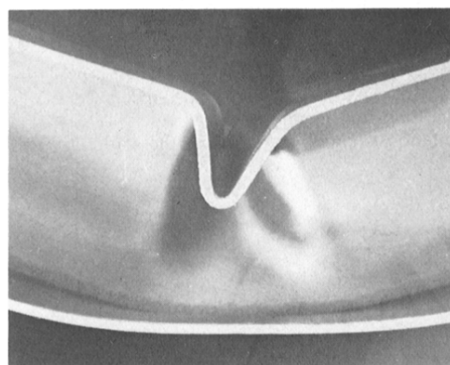
Kecman basó su modelo teórico de mecanismo de fallo en la segunda fase de fallo, que es a la que pertenecen los ángulos de giro permitidos en las estructuras de seguridad de vehículos.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.8: Mecanismo de rótula típico que se produce doblando un tubo de sección cuadrada (38 x 38 x 1.6 mm) en voladizo de 1 m de longitud (Kecman, 1983).

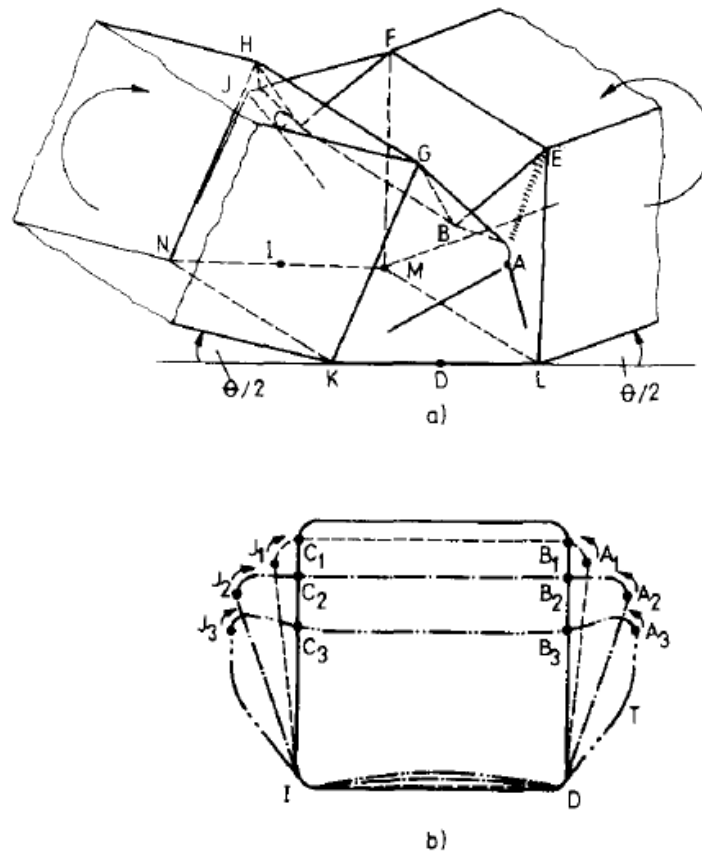


Figura 2.9: Mecanismo de rótula teórico (Kecman, 1983).

Tomando como hipótesis que las paredes de la sección se deforman sólo a lo largo de las líneas de fluencia, que las paredes son incompresibles e inextensibles y que se mantiene la continuidad estructural en las dos secciones características vistas en la figura 2.8 (b y c), Kecman desarrolló un modelo para predecir las curvas momento-rotación y la energía absorbida durante el colapso por fallo a flexión a partir de las dimensiones de la sección transversal y el límite de fluencia del material.

Para ello, calculó la energía que absorbe cada una de las aristas en las que divide la rótula plástica (Figura 2.9 (a)) y sumó el total. Por último, obtuvo las gráficas momento-rotación calculando de forma numérica la derivada de esta energía total con respecto al ángulo que gira la rótula.

Tanabe et al. estudiaron experimentalmente el comportamiento ante flexión de tubos de acero usados como refuerzo ante colisión en puertas de automóviles (Tanabe et al., 1995). Determinaron que el proceso de deformación puede dividirse en tres etapas: aplastamiento de la sección transversal, colapso/fallo plástico y pandeo circunferencial. Estas

etapas se examinaron junto con la curva carga aplicada - flecha y las propiedades de absorción de energía para obtener la tensión máxima admisible.

Más adelante Kim y Reid revisaron los métodos que existían hasta el momento para el análisis de tubos rectangulares de pared delgada sometidos a flexión en su eje principal (Kim and Reid, 2001) y sugirieron un modelo de fallo que da una solución analítica mejorada para la relación momento-giro que, a diferencia del modelo de Kecman, es cinemáticamente admisible y completamente analítico. Las predicciones del modelo mostraron concordancia con los experimentos realizados.

Hooputra et al. presentaron un modelo numérico de predicción del fallo de un elemento basado en deformaciones y tensiones macroscópicas (Hooputra et al., 2004). Para ello se basaron en la combinación de una serie de mecanismos de fallo, como son la formación de cuellos debida a inestabilidades locales o el fallo por cortante o cizallamiento y el fallo dúctil.

La comparación de los resultados numéricos con los datos experimentales realizados en tubos de doble cámara confirmó la predicción del fallo del tubo, tanto en términos de la forma como de la localización de las grietas, aunque sólo puede predecir el inicio de estas últimas.

Es interesante mencionar que la mayoría de ensayos realizados se realizaron en régimen cuasiestático, mientras que los ensayos en régimen dinámico están mucho menos extendidos. Los impactos a una velocidad media-alta suponen una parte importante de las colisiones que sufre un vehículo, por lo que es de gran interés estudiar cómo se comporta un tubo cuando se somete a un esfuerzo flector con una velocidad inicial (ensayo dinámico) en lugar de aplicar una deformación constante (ensayo cuasiestático).

Sin embargo, en lugar de incidir sobre el comportamiento a flexión dinámica, la investigación en el campo de los elementos de absorción de energía se ha centrado en los tubos rellenos de distintos elementos para aumentar su capacidad de absorción de energía, como es el caso de espumas metálicas (Hanssen et al., 2000; Guo et al., 2010; Guo and Yu, 2011), estructuras tipo sándwich (Crupi and Montanini, 2007; Yu et al., 2008) o incluso rellenas de hormigón (Guo et al., 2007).

Por este motivo se ha decidido centrar el presente proyecto de fin de carrera en el estudio del comportamiento de un tubo de aluminio sometido a un ensayo dinámico de flexión en tres puntos.

3.1. Introducción

El aluminio tiene una combinación de propiedades que lo hacen sumamente útil como material de ingeniería. Ocupa el segundo lugar en el mercado de los metales, superado sólo por el acero.

El rápido crecimiento de la industria del aluminio se atribuye a esa combinación de propiedades que lo convierten en el más versátil de los materiales de construcción. Su baja densidad lo hace particularmente útil para productos manufacturados para el transporte. Además tiene también gran resistencia a la corrosión en la mayoría de los ambientes naturales, debido a la película de óxido tenaz que se forma en su superficie. Aunque el aluminio puro tiene baja resistencia, alguna de sus aleaciones tiene una resistencia mayor que la del acero estructural. El aluminio no es tóxico y se usa ampliamente en recipientes y envases para alimentos. Las buenas propiedades eléctricas del aluminio lo hacen adecuado para muchas aplicaciones en la industria eléctrica. También es un buen conductor del calor y se mecaniza con facilidad.

El aluminio es el elemento metálico más abundante en la corteza terrestre, pero siempre aparece combinado con otros elementos como pueden ser hierro, silicio y oxígeno. La bauxita, compuesta principalmente por óxidos de aluminio hidratados, es el principal mineral utilizado para la producción de aluminio. A través del proceso Bayer es posible extraer óxido de aluminio puro (también conocido como alúmina) a partir de la bauxita.

El principal inconveniente para su obtención reside en la elevada cantidad de energía eléctrica que requiere su producción. Este problema se compensa por su bajo coste de reciclado, su extendida vida útil y la estabilidad de su precio.

3.2. Tendencia en la industria del aluminio

La industria del aluminio primario de hoy tiene poco que ver con lo que era hace 40 años. Las economías BRIC representan en la actualidad más del 40 % de la producción de bauxita, mientras que la producción de alúmina se ha desplazado hacia los países de ricos en bauxita, y lejos de las economías industrializadas (ver figura 3.1). Como reacción al aumento continuo de los precios de la energía y, en algunos casos, a las políticas industriales del gobierno, la producción primaria ha pasado de regiones como Estados Unidos, Japón y la mayoría de los países de Europa occidental hacia China, Rusia, Canadá, Brasil, Australia, Oriente Medio, India y algunas partes del sudeste de Asia. El grado de competencia ha aumentado, impulsada no sólo por una concentración y la integración menores, sino también por la presencia de diferentes grupos estratégicos con diferentes intereses económicos.

El transporte es posiblemente el mercado de uso final que ahora domina, representando el 35-40 % de los envíos totales de japoneses, de América del Norte y Europa Occidental .

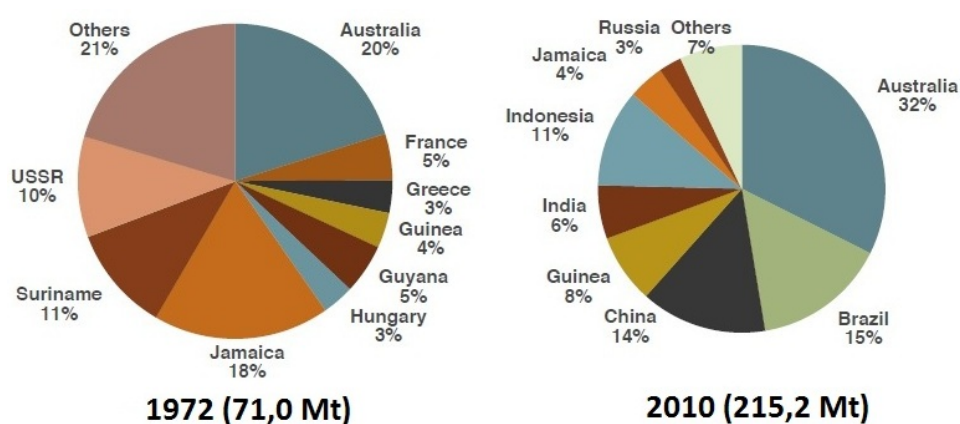


Figura 3.1: Producción global de Bauxita en 1972 y 2010 (Nappi, 2013).

Se han producido cambios estructurales significativos en el lado de la demanda en la ecuación de la industria, donde el 60 % de la cuota combinada del consumo mundial en poder de seis países industrializados en 1972 se redujo al 25 %, sustituido por China (40 % en 2010), la India y Brasil.

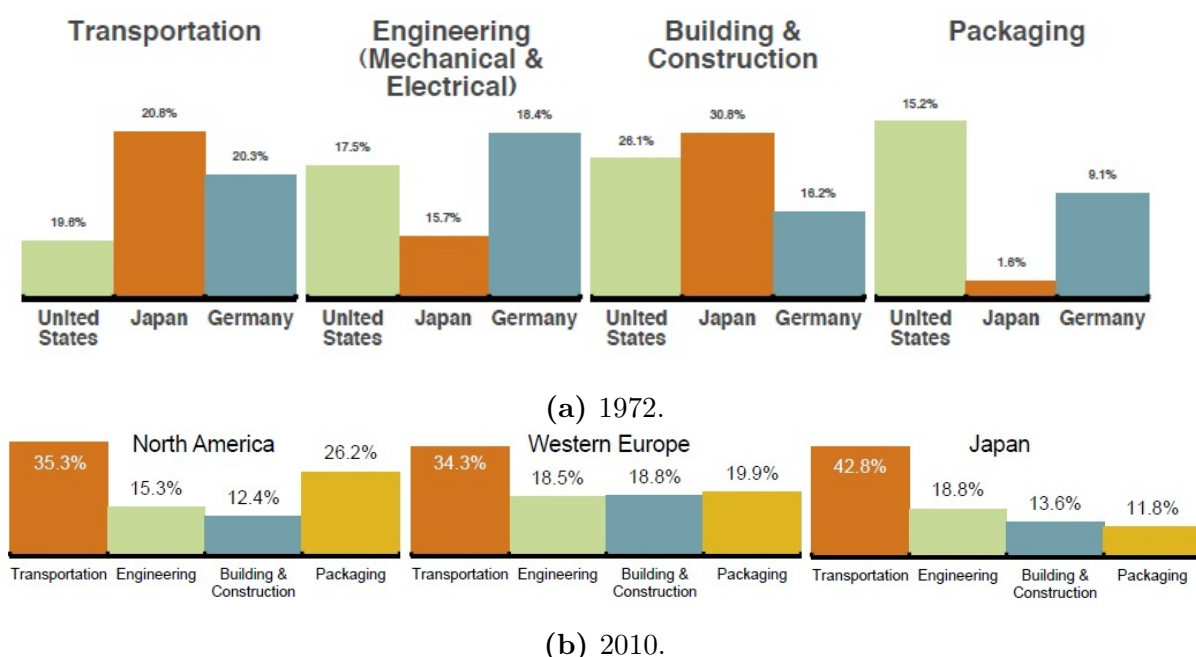


Figura 3.3: Sectores de uso final de aluminio (Nappi, 2013).

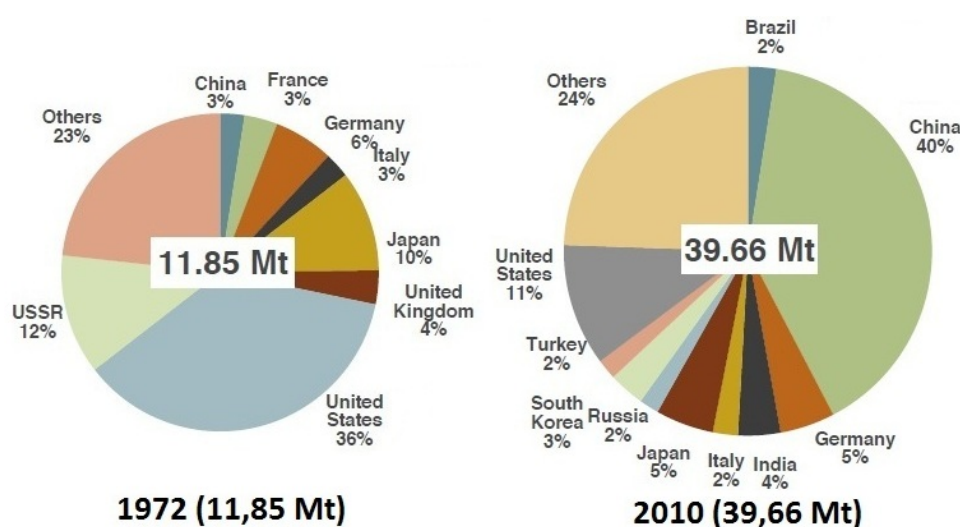


Figura 3.2: Consumo global de aluminio primario en 1972 y 2010 (Nappi, 2013).

Los precios al contado de aluminio también son más volátiles que hace 40 años: durante el período 1973-2011, el grado de volatilidad (desviación estándar sobre los precios medios) alcanzó 0.335, más del doble del valor correspondiente para el período 1946-1972. La

demanda de los inversores ha "financiado" los mercados de metales básicos. Este nuevo factor puede explicar parte del aumento en los precios del metal cuando los precios de futuros exceden los precios al contado por un margen lo suficientemente alto como para más que compensar los costes financieros y de almacenamiento. Otras variables deben ser tenidas en cuenta en las hipótesis alternativas del mercado.

Mirando hacia el futuro, incluso si el consumo de aluminio primario ha estado creciendo a un ritmo de alrededor del 3% por año (ver figura 3.4) en los últimos 40 años, se puede esperar una mayor tasa compuesta anual de alrededor del 4,0% en los próximos dos decenios, ya que factores como la urbanización, la industrialización y el desarrollo económico en los países emergentes del BRIC y otros siguen afectando positivamente el uso de aluminio.

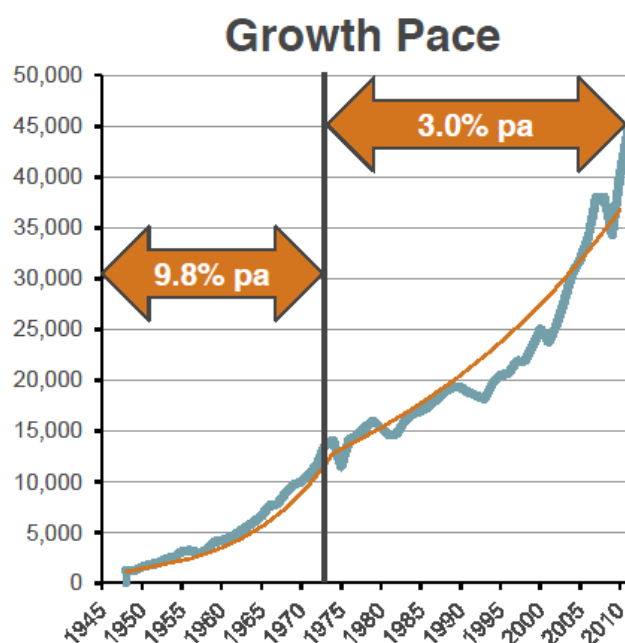


Figura 3.4: Ritmo de crecimiento del consumo de aluminio primario (Nappi, 2013).

Incluso si el consumo per cápita de economías maduras como Alemania, Corea del Sur, Japón y los Estados Unidos se ha estabilizado en torno a 20 kg en 2010 y puede que baje ligeramente durante los próximos años, no ocurre igual en el caso de países como India (sólo 2kg por cabeza) , Brasil y Tailandia (unos 5 kg) , Turquía (8 kg) o Malasia y china (ligeramente por encima de 10 kg per cápita). Si estos países siguen más o menos el mismo patrón de crecimiento que han seguido las economías maduras actuales, el consumo de aluminio primario se duplicará en los próximos 20 años. Algunos factores, tales como

políticas medioambientales más estrictas, eficiencia energética, reducción de personal, la globalización o el desarrollo continuo de nuevas aplicaciones; pueden aumentar el uso de aluminio a un ritmo más rápido de lo esperado.

Por otro lado, la sustitución negativa en favor de los plásticos o nuevos materiales, las políticas que favorecen el crecimiento en lugar del desarrollo sostenible o el reto de desarrollar nuevas aplicaciones en un sector tan fragmentado como el aluminio, pueden resultar en una menor demanda de lo previsto.

Esta proyección de crecimiento implica que, para satisfacer la demanda prevista en 2030 sería necesario el equivalente a unas 40-50 fundiciones nuevas (con una capacidad de 500 kilotoneladas anuales cada una). La capacidad adicional requerida será, de hecho, aún mayor, ya que algunas fundiciones estarán desmanteladas o en desuso durante dicho periodo. Estas expansiones (zonas industriales abandonadas) y/o nuevas inversiones (terrenos no urbanizados) presentarán nuevos retos en cuanto a la puesta en marcha de una producción adicional de bauxita, alúmina y carbono, y el desarrollo de nuevas fuentes de energía. Dado que la electricidad seguirá siendo el piloto más importante de la competitividad, los nuevos hornos de fundición se encontrarán en la región de Oriente Medio, Rusia, las provincias del oeste y noroeste de China, Malasia, África (entre ellos Argelia, Angola y el Congo), India y otras regiones donde la energía puede estar disponible. Fuentes de competitividad debidas a las leyes o la política (subvenciones, legislación, tipos de cambio infravalorados) permanecerán presentes, influyendo no sólo el nivel de la oferta total, sino también en su distribución entre las regiones mencionadas anteriormente.

El futuro de la industria mundial del aluminio se verá influido por su capacidad para reducir al mínimo los impactos ambientales y para ser considerado como una solución a algunos de los problemas generados por las emisiones de CO₂. Por ejemplo, según un estudio reciente realizado por la Asociación del Aluminio (septiembre de 2011), de América del Norte 2009 el "*aligeramiento de peso*" de vehículos con aluminio compensan el 90 % del consumo de energía y el 96 % de las emisiones de gases de efecto invernadero acumuladas asociadas con la producción de aluminio primario (Nappi, 2013). Aún más, el 75 % de todo el aluminio jamás fabricado - que data de 125 años y en diversas generaciones - se encuentra todavía en uso hoy en día como el metal se recicla después de cada uso de fase, lo que incrementará aún más los dividendos de sostenibilidad del metal.

Al igual que el aumento de los precios de la energía a mediados de la década de 1970, la legislación sobre las emisiones de CO₂ puede afectar ambos lados del mercado de forma simultánea. Un crecimiento del suministro puede, hasta cierto punto, verse obstaculizada por los mayores costos de producción relacionados con las emisiones y precios más altos tanto de materias primas como de energía.

Sin embargo, los límites de emisiones de CO₂ también pueden favorecer el uso de aluminio al fomentar la eficiencia energética y la reducción de peso, con los beneficiarios

potenciales en transporte, distribución y transmisión de energía, aire acondicionado y refrigeración, energías renovables edificios verdes y otros sectores de uso final.

Algunas características de los productos de aluminio, tales como su peso ligero, resistencia, punto de fusión moderada, ductilidad, conductividad y resistencia a la corrosión seguirán siendo muy demandadas en el futuro.

3.3. El aluminio como metal ligero

Tradicionalmente, se ha dado el nombre de “metales ligeros” tanto al aluminio como al magnesio porque frecuentemente se utilizan para reducir el peso de componentes y estructuras. Partiendo de esta base, también se deberían incluir el titanio y el berilio. Estos cuatro metales tienen unas densidades relativas que abarcan desde 1,7 (magnesio) hasta 4,5 (titanio), que podemos comparar con el 7,9 y el 8,9 de los viejos metales usados en estructuras, hierro y cobre, o el 22,6 del osmio, el más pesado de los metales (Polmear, 2005).

Esta ligereza se traduce directamente como una mejora de las propiedades del material para muchos productos, ya que la mayor reducción de peso se consigue mediante una disminución de la densidad (Ver figura 3.5). Ésta es una razón obvia de por qué los metales ligeros siempre han estado asociados al transporte, especialmente al aeroespacial, lo que ha promovido grandes estímulos al desarrollo de aleaciones ligeras durante los últimos 50 años.

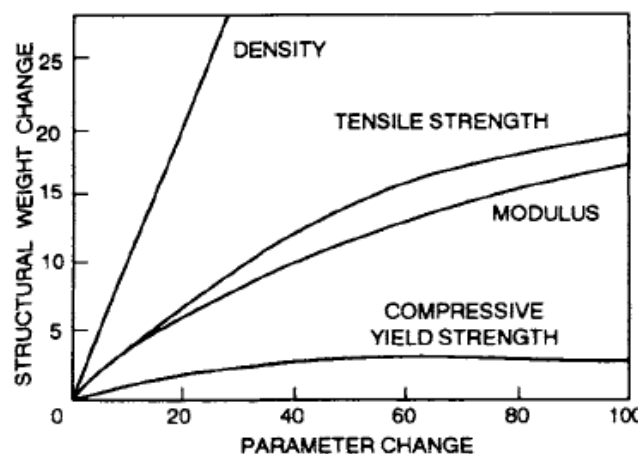


Figura 3.5: Efecto de la mejora de las propiedades en función del peso estructural (Polmear, 2005)..

La relación resistencia-peso ha sido otro de los estudios dominantes. En la posición central del diagrama de Ashby representado en la figura 3.6 podemos ver las aleaciones ligeras con base de aluminio, magnesio o titanio con respecto tanto a otras aleaciones usadas en ingeniería como a otros materiales.

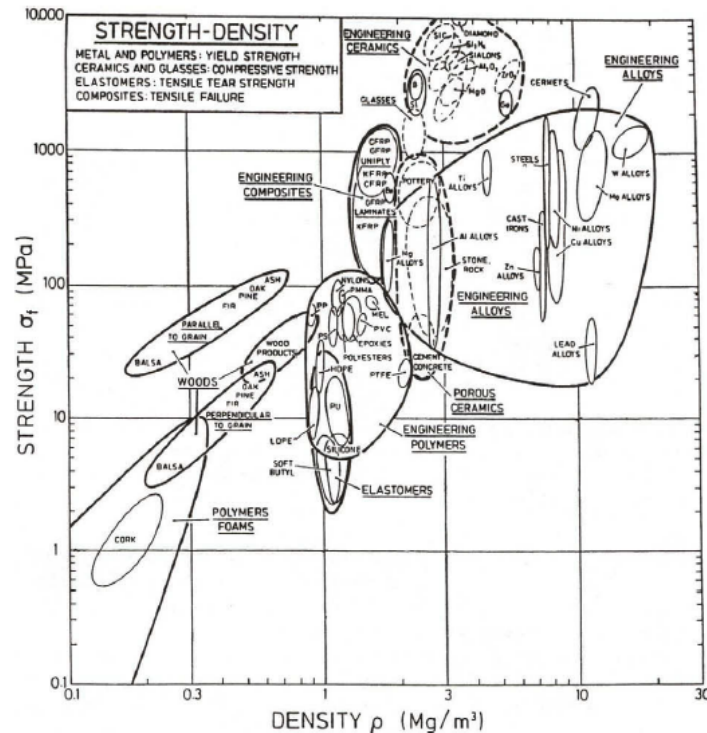


Figura 3.6: relación resistencia-densidad para aleaciones ligeras y otros materiales usados en la ingeniería.

Nótese que se ha usado la resistencia a fluencia como medida de la resistencia de metales y polímeros, la resistencia a compresión para materiales cerámicos, la resistencia al desgarro para elastómeros y la resistencia a tracción para materiales compuestos. (Polmear, 2005).

Las ventajas de una baja densidad se vuelven más importantes en la ingeniería del diseño cuando se tienen en cuenta parámetros tales como la rigidez y la resistencia al pandeo. Por ejemplo, la rigidez de una viga rectangular es directamente proporcional al producto de su módulo elástico y el cubo de su grosor. La importancia de esta relación se ilustra en el nomografo mostrado en la figura 3.7, que permite estimar el peso de vigas similares de diferentes metales y aleaciones. Una viga de hierro (o acero) que pesa 10 kg tendrá la misma rigidez que una viga de igual longitud y anchura que pese 7 kg en el caso de que fuera de titanio, 4,9 en el caso de aluminio, 3,8 kg en el de magnesio y sólo 2,2 kg en el caso de berilio (Polmear, 2005). La rigidez comparativa para vigas de igual peso

se incremente en la proporción 1:2,9:8,2:18,9 para el acero, titanio, aluminio y magnesio respectivamente.

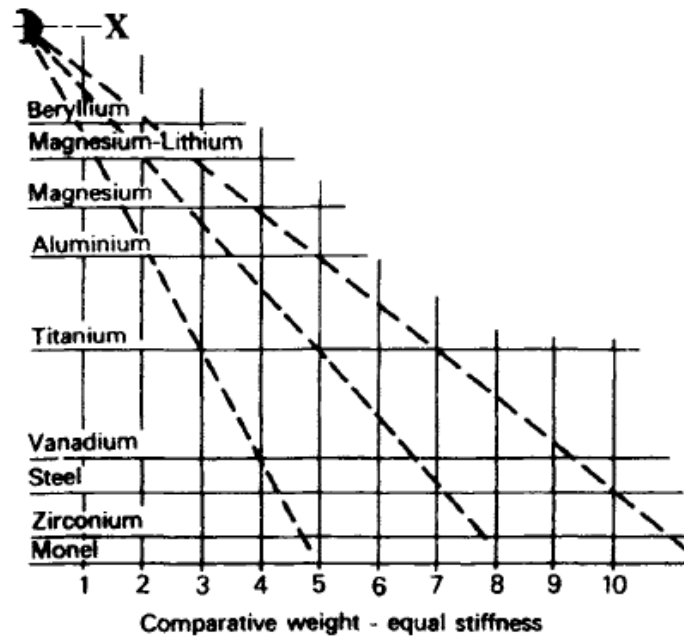


Figura 3.7: Nomografo que permite comparar los pesos comparativos de diferentes metales o aleaciones para un mismo valor de rigidez. Estos valores pueden obtenerse a partir del punto en el que se cruza una línea dibujada desde el punto X con las líneas que representan diferentes metales o aleaciones. (Polmear, 2005)..

La importancia de aspectos como el ahorro de peso no debería eclipsar otras propiedades de considerable importancia tecnológica, como puede ser a alta resistencia a la corrosión y alta conductividad termoelectrónica del aluminio, la maquinabilidad del magnesio y la resistencia a la corrosión extrema del titanio.

3.3.1. Abundancia relativa

La tabla 3.1 muestra la abundancia en la corteza terrestre de los elementos químicos principales. Los metales ligeros aluminio, magnesio y titanio se encuentran en las posiciones primera, tercera y cuarta entre los metales estructurales. También se aprecia que metales tradicionales como el cobre, plomo y zinc se encuentran en una proporción menor del 0,10 %. En general, las reservas de metales ligeros son adecuadas para hacer frente a la demanda de los próximos siglos. El alcance del uso que se haga de ellos parece estar en manos de su futuro coste relativo, compitiendo con el de otros materiales tales como

el acero o los plásticos, además de la disponibilidad de energía eléctrica necesaria para la extracción de los minerales.

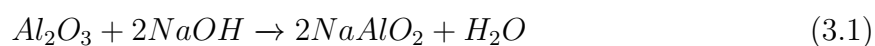
Element	% by weight
Oxygen	45.2
Silicon	27.2
Aluminium	8.0
Iron	5.8
Calcium	5.06
Magnesium	2.77
Sodium	2.32
Potassium	1.68
Titanium	0.86
Hydrogen	0.14
Manganese	0.10
Phosphorus	0.10
Total	99.23

Tabla 3.1: Abundancia en la corteza terrestre de los principales elementos químicos. (Polmear, 2005).

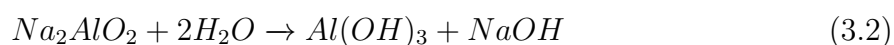
3.4. Producción de aluminio

Como se ha mencionado anteriormente, el aluminio se encuentra principalmente en la forma de bauxita, de la que se extrae el aluminio mediante el proceso Bayer.

En el proceso Bayer, En el proceso Bayer, la bauxita reacciona con hidróxido de sodio caliente para convertir el aluminio del mineral de hierro en aluminato de sodio, de acuerdo a la reacción



Después de la separación del material insoluble, compuesta principalmente por óxido de hierro y sílice, la solución de aluminato se enfría a 25-35°C para que precipite hidróxido de aluminio, según la reacción



La solución de hidróxido de aluminio ($Al(OH)_3$) se deja espesar y se calcina a 1100°C para obtener óxido de aluminio, Al_2O_3 .

El óxido de aluminio se disuelve en un baño de criolita fundida (Na_3AlF_6) y se electroliza en una cuba electrolítica (Figura 3.8) utilizando ánodo y cátodo de carbono. En el proceso de electrólisis se forma aluminio metálico en estado líquido en los cátodos de carbono, que luego se hunde en el fondo de la cuba debido a su mayor densidad. Durante la electrólisis, se libera oxígeno en los ánodos, donde se combina con el carbono y forma monóxido y dióxido de carbono (CO y CO_2). El aluminio fundido se extrae de la cuba periódicamente y se trata en estado líquido para eliminar excesos de óxido y gases. Dicho aluminio suele contener de 99.5 a 99.9 por ciento de aluminio, siendo hierro y silicio sus principales impurezas.

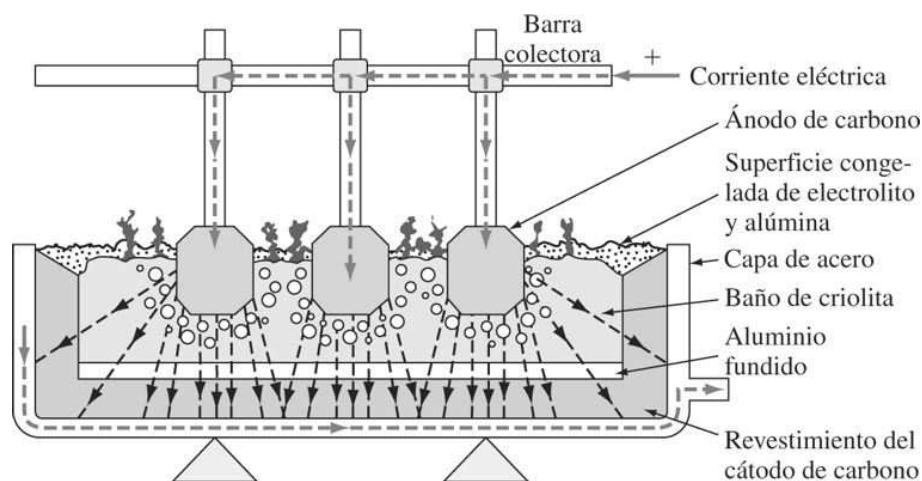


Figura 3.8: Cuba electrolítica utilizada en la producción del aluminio (William, 1998).

El primer paso en el procesamiento de aluminio. Primero, se llenan grandes hornos con revestimiento refractario de aluminio que proviene de las cubas electrolíticas, donde se refina antes de fundirlo en lingotes. Los elementos de la aleación y los lingotes maestros del elemento de aleación pueden fundirse y mezclarse también junto con la carga del horno. En la operación de refinación, el metal líquido suele purgarse con cloro gaseoso para eliminar el gas hidrógeno disuelto, tras de lo cual se hace un desnatado de la superficie de metal líquido para eliminar el metal oxidado. Después de esto, el metal pasa por una criba y se funde en lingotes para ser vuelto a fundir, o bien se funde en formas primarias de lingote, como lámina, o en lingotes de extrusión para los procesos ulteriores de fabricación.

3.5. Especificaciones de aluminio

En las especificaciones de aluminio, un sistema de índice de cuatro dígitos se utiliza para la designación de aleaciones de aluminio forjadas y templadas.

Estas dos clases de aleaciones de aluminio pueden ser subdivididas en familias de aleaciones basadas en la composición química y en la designación del templado.

El aluminio puro es aleado con muchos otros metales para producir una amplia gama de propiedades físicas y mecánicas. Los elementos de aleación se utilizan como base para clasificar las aleaciones de aluminio en dos categorías: no tratables térmicamente y tratables térmicamente .

La mayor parte de las especificaciones de aluminio designan las aleaciones de aluminio de la siguiente manera:

- Primer dígito - componente (s) de aleación principal
- Segundo dígito - variaciones de la aleación inicial
- Tercer y cuarto dígitos - variaciones individuales de aleación (el número no tiene significado pero es único)

Especificaciones de aluminio forjado. El grupo de aleación de forjado se muestra como: 1xxx-puro Al (99.00 % o mayor); aleaciones 2xxx-Al-Cu; aleaciones 3xxx-Al-Mn; aleaciones 4xxx-Al-Si; aleaciones 5xxx-Al-Mg; aleaciones 6xxx-Al-Mg-Si.

Especificaciones de aluminio fundido. El sistema de designación y las especificaciones para aleaciones de aluminio fundido son similares en algunos aspectos a la de las aleaciones de forjado. El sistema de designación de aleación de fundición también tiene cuatro dígitos y el primer dígito especifica el principal componente de aleación (es). Sin embargo, se utiliza un punto decimal entre el tercer y cuarto dígitos para dejar claro que se trata de designaciones utilizadas para identificar las aleaciones en forma de piezas moldeadas (0) o lingotes de fundición (1,2).

Una letra antes de la designación numérica indica una modificación de la aleación original o un límite de impureza. Estas letras de serie se asignan en orden alfabético empezando por A, pero omitiendo I, O, Q y X, siendo X reservada para aleaciones experimentales. El grupo de aleación de fundición se muestra como: 1xx.x-Al puro (99,00 % o mayor), aleaciones 2xx.x Al-Cu; 3xx.x de Al-Si + Cu y / o Mg; 4xx.x de Al-Si; 5xx.x Al-Mg; 7xx.x - Al-Zn; 8xx.x-Al-Sn; 9xx.x-Al+Otros elementos y series 6xx.x sin usar.

Sistema Designación-Templado de aleación de aluminio. Los templados son muy importantes para las especificaciones de aluminio debido a su influencia crucial para las propiedades del material. El sistema de designación de templado se basa en las secuencias de tratamientos mecánicos o térmicos, o ambos, que se utilizan para producir

los diferentes templados. La designación templado siempre se presenta inmediatamente después de la designación de la aleación con un guión entre la designación y el templado (eg 2014-T6, 3003-H14, 1350-H19 (extra fuerte), etc.) El primer carácter de la designación de templado es una letra mayúscula que indica la clase general de tratamiento, tales como: F-como fabricado; O-recocido; H-endurecido por tensión; W-tratado térmicamente en solución y T-tratado térmicamente para producir templados estables que no sean F, S o H. Note que las designaciones templado difieren entre aleaciones tratables térmicamente y aleaciones no tratables térmicamente y sus significados se indican a continuación.

Aleaciones de aluminio no tratables térmicamente. La letra "H" siempre va seguida de 2 o 3 dígitos. El primer dígito indica el método particular usado para obtener el templado, de la siguiente manera: H1-significa endurecido únicamente por tensión, H2-significa endurecido por tensión y luego recocido parcialmente y H3-significa endurecido por tensión y después estabilizado. El templado se indica por el segundo dígito de la siguiente manera: 2-1/4 duro; 4-1/2 duro; 6-3/4 duro; 8-completamente duro y 9-extra duro, lo que significa que los dígitos añadidos indican modificación de la norma práctica. Las aleaciones no tratables térmicamente se encuentran mayoritariamente en las series de aleaciones 1xxx, 3xxx, 4xxx, y 5xxx dependiendo de sus principales elementos de aleación.

Aleaciones de aluminio tratables térmicamente (p.e. F, O or T): La letra "T" sigue siempre de uno o más dígitos. Estos dígitos indican el método utilizado para producir los templados estables, de la siguiente manera: T3-Tratado por solución de calor y luego trabajado en frío, T4-Tratado por solución de calor y luego envejecido naturalmente, T5-sólo envejecido artificialmente, T6-Tratado por solución de calor y luego envejecido artificialmente etc. Las aleaciones tratables térmicamente se encuentran principalmente en las series de aleaciones 2xxx, 6xxx y 7xxx.

3.6. Tratamientos Térmicos

A diferencia de los aceros, los tratamientos térmicos en el aluminio pueden incluir procesos de deformación, entre estos tratamientos está: el recocido, disolución, temple y envejecimiento o revenido. No obstante, no todos estos procesos pueden utilizarse en todos los tipos de aluminio, debido a que no responden a los tratamientos térmicos de endurecimiento.

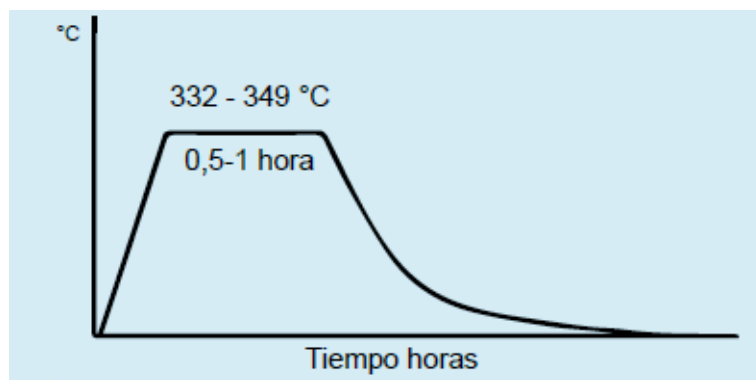
Por ejemplo, el recocido, aplica a todas las aleaciones de aluminio, mientras que la disolución y el temple sólo se pueden aplicar a algunas de estas aleaciones.

En este sentido, antes de explicar en qué consiste cada proceso, es importante aclarar que de las aleaciones de aluminio laminado, sólo las series 2xxx, 6xxx 7xxx y algunas 8xxx pueden ser tratadas térmicamente. En cuanto a las fundiciones, pueden ser tratadas las

de la serie 2xx.x, 3xx. xm 7xx.x y algunas 8xx.x.

Recocido (-0): es un proceso que, utilizando una temperatura y unos tiempos de enfriamiento controlados, permite reducir la dureza del aluminio y lo prepara para el proceso de disolución y posterior envejecimiento. Existen dos tipos de recocido: parcial y total, en el primero, el proceso se realiza a menor temperatura y el enfriamiento es más rápido, mientras que el recocido total requiere de un enfriamiento controlado en el horno.

En ambos casos hay reducción de la dureza y de las propiedades mecánicas, pero en el proceso parcial, se eliminan tensiones y su efecto es menor en el material, que en el caso del recocido total. A un material recocido se le nombra o codifica con un (-0) al final del tipo de aleación, ejemplo: 7075 -0. (Ver gráfico a y b)



(a) Recocido parcial



(b) Recocido total

Figura 3.9: Gráficas de recocido de aluminio (Obando and Sánchez, 2014).

Disolución y temple (-w): Los procesos de disolución de una aleación de aluminio están estrechamente relacionados con el calentamiento y enfriamiento del material.

En el caso del aluminio 2024-0, por ejemplo, en condición de recocido (-0), el primer paso es la disolución, que por lo regular se lleva a cabo en un horno de sales o de atmósfera a una temperatura de 495 °C durante el tiempo necesario para que se diluyan los precipitados.

Es importante mencionar que a diferencia del acero, cuyos precipitados son pequeños carburos contenidos en la misma estructura interna del material, los precipitados en un aluminio son partículas formadas a partir de los aleantes que éste contiene, los cuales se disuelven en el proceso de disolución. Es por esta razón que la disolución no se podría aplicar a los aceros, por lo menos no a todos, pues la estructura interna de ambos materiales es totalmente diferente.

Una vez finalizado este procedimiento, se efectúa un “temple”, en el cual se enfría bruscamente la aleación en agua o en un quenchant (polímero a base de agua) a temperatura ambiente. La diferencia entre un medio u otro consiste en que el agua permite un enfriado más drástico pero puede llegar a deformar el material. El quenchant, por su parte, elimina la energía del material no tan drásticamente, pero si evita que el material se deforme.

El uso de un medio de otro depende pues del tipo de aleación y geometría de la pieza. Vale anotar que el proceso de disolución y temple se designa mediante una -W.

Envejecimiento(-Tx): También conocido como revenido o maduración, es un proceso que puede ocurrir a temperatura ambiente (envejecimiento natural) o a temperaturas en el orden de los 120 °C (envejecimiento artificial), en donde, de manera controlada, se produce la formación de precipitados, bien distribuidos y con morfología controlada. Este proceso es el encargado de dar la resistencia final y la dureza requerida.

Para aumentar la dureza y la resistencia a la tensión, de la aleación 2024, por ejemplo, es necesario exponerla –luego de la disolución y posterior temple– a un proceso de envejecimiento natural, hasta el valor máximo posible, es decir a temperatura ambiente en un período de 96 horas; pasado este tiempo, la aleación pasa de condición 2024-W a 2024-T4.

A diferencia de la aleación 20-24, aleaciones como la 7075 requieren de un envejecimiento artificial por lo que debe ingresar en un horno de atmósfera o de sales a una temperatura de 120 °C por 24 horas para alcanzar la dureza y resistencia a la tensión máxima. Este último tratamiento cambia la condición del aluminio a 7075-T6 (ver figura fig:Envejecimiento-aluminio).

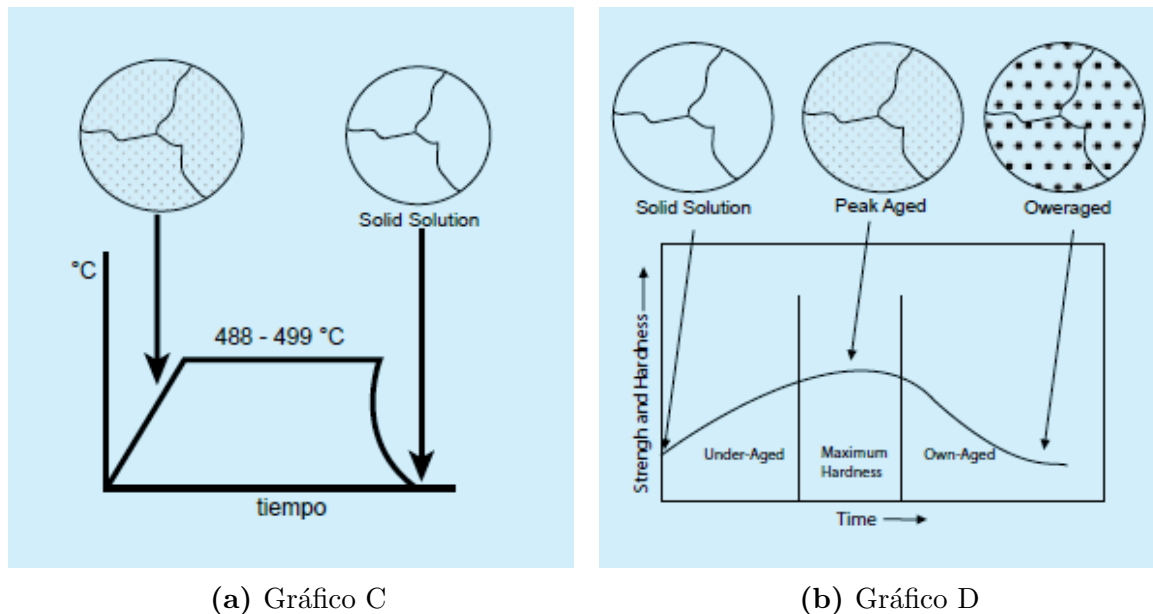


Figura 3.10: Gráficas de envejecimiento de aluminio (Obando and Sánchez, 2014).

En el gráfico (c) en la circunferencia se muestran unos pequeños puntos de color negro, los cuales representan los precipitados del aluminio. Luego se muestra la misma estructura, pero sin los puntos, lo que significa que ya se le practicó el proceso de disolución.

En la gráfica (d) se muestra que en el medio se forman nuevamente los precipitados o puntos negros, debido al proceso de envejecimiento y cuya función es otorgarle al aluminio mayor dureza y resistencia.

El *overaged* o sobre-envejecimiento, mostrado en la circunferencia final, es un segundo proceso de maduración que se le practica a la pieza, pues muchas veces cuando ésta alcanza su dureza máxima, adquiere también fragilidad, por lo que es necesario realizar nuevamente el envejecimiento en el material, con el fin que las partículas aumenten de tamaño y minimicen así este fenómeno, esto con una leve reducción de la resistencia y dureza.

3.6.1. Aleaciones de aluminio forjado

Las formas de lingote como la lámina y los lingotes de extrusión suelen ser fundidos en un proceso semicontinuo mediante el método de enfriamiento directo. En este método de colada el metal fundido se vacía en un molde con un fondo móvil que desciende lentamente a medida que se llena (Figura 3.11).

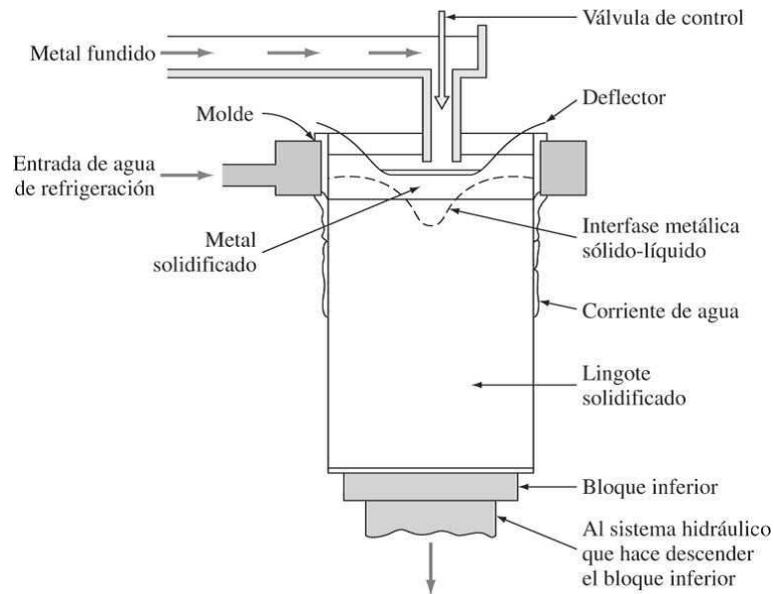


Figura 3.11: Esquema del método de enfriamiento directo (William, 1998).

El molde se enfría por agua mediante una camisa y también se rocía agua en los laterales de la superficie solidificada del lingote. Por este procedimiento pueden colocarse continuamente grandes lingotes de aproximadamente 5 metros de longitud, como se muestra en la figura 3.12.

En el caso de los lingotes de lámina, se elimina cerca de media pulgada de metal de la superficie de los lingotes que estará en contacto con los rodillos del tren de laminado en caliente.

Esta operación se llama *escalpación* y se realiza para garantizar que la lámina o la placa fabricada tengan una superficie limpia y tersa. A continuación, los lingotes se *precalientan* u *homogeneizan* a altas temperaturas entre 10 y 24 horas para permitir que la difusión atómica haga que la composición del lingote sea uniforme. También se añaden elementos constitutivos (como por ejemplo elementos ricos en manganeso en la aleación 3003). El precalentamiento debe hacerse a una temperatura inferior al punto de fusión del elemento constitutivo que tenga la temperatura de fusión más baja.

Después del recalentamiento, los lingotes se *laminan en caliente* utilizando un tren de laminado en caliente con cuatro marchas altas y retroceso. Los lingotes suelen laminarse en caliente hasta alcanzar un grosor de 3 pulgadas aproximadamente; luego se vuelven a calentar y se laminan en caliente hasta llegar a un espesor de entre 3/4 y 1 pulgada, con un tren de laminado en caliente intermedio (Figura 3.13).

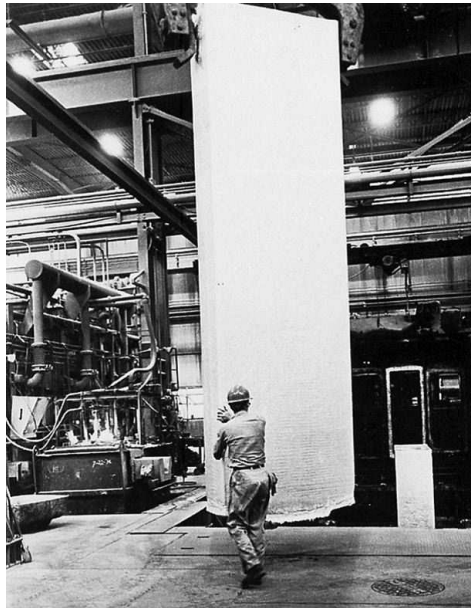


Figura 3.12: fotografía de un lingote grande fundido de manera semicontinua al ser extraído del foso de colada. (William, 1998).

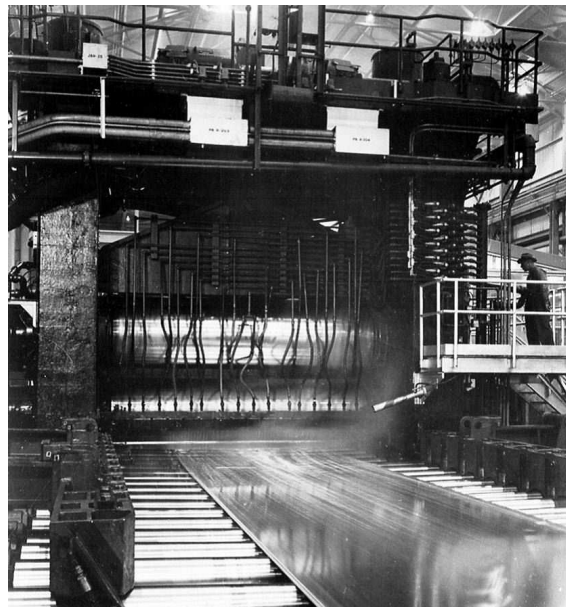


Figura 3.13: Laminador de grandes dimensiones con cuatro rodillos laminando una plancha de una aleación de aluminio que con el tiempo será reducida hasta producir una chapa de aluminio.(William, 1998).

La reducción ulterior se realiza usualmente en una serie de trenes de laminado en caliente en tándem, para producir metal de aproximadamente 0.1 pulgadas de grosor. En la figura 3.14 se muestra una operación típica de laminado en caliente. Por lo general se necesita más de un recocido intermedio para producir lámina delgada.

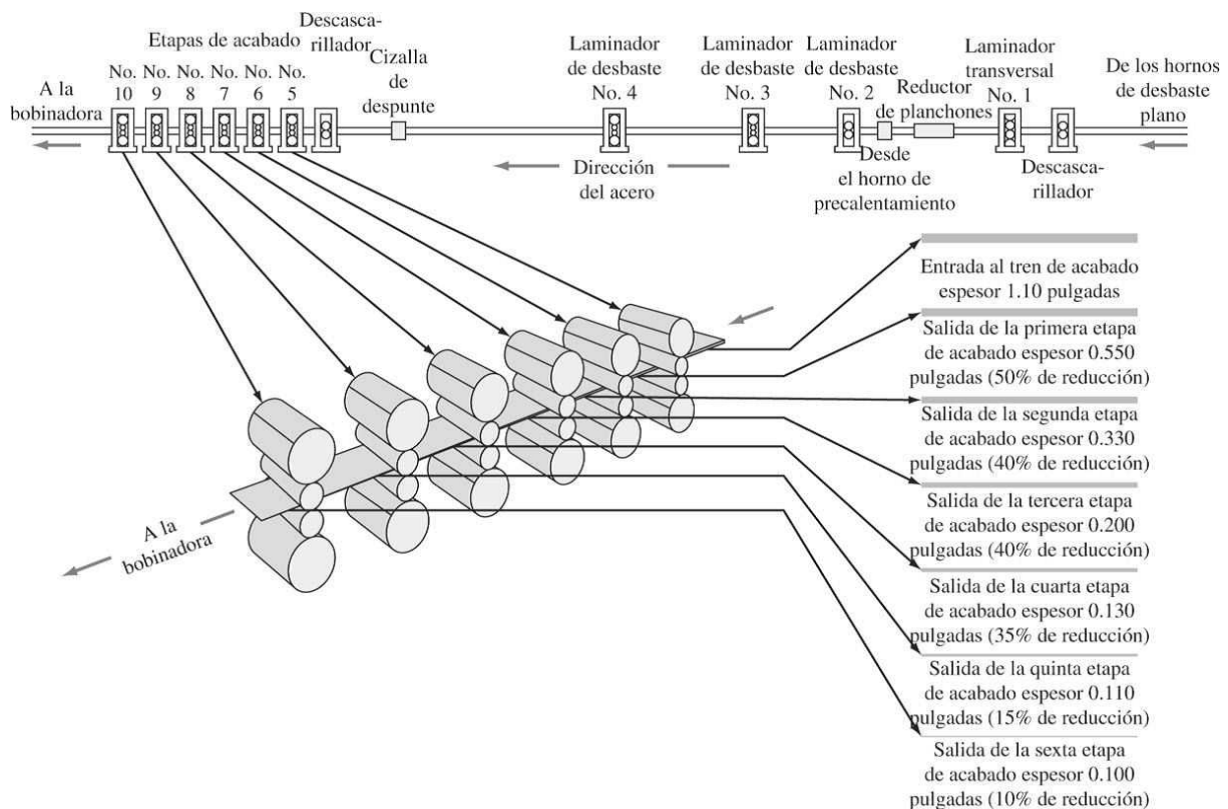


Figura 3.14: Típica reducción por pasos en las etapas de acabado de un tren de laminación en caliente de banda equipado con cuatro laminadores de desbaste y seis de acabado (William, 1998).

Las aleaciones de aluminio producidas en forma forjada (por ejemplo, lámina, placa, extrusiones, varilla y alambre) se clasifican de acuerdo con los principales elementos con los que están aleados. Para identificar a las aleaciones forjadas de aluminio se utiliza una clave numérica de cuatro dígitos. El primer dígito indica el grupo de la aleación que contiene elementos aleados específicos. Los dos últimos dígitos identifican a la aleación de aluminio o indican su pureza. El segundo dígito indica la modificación de la aleación original o los límites de su impureza. En la tabla 3.2 se presenta la lista de los grupos de aleaciones de aluminio forjado.

Aluminio, 99.00% como mínimo o más	1xxx
Aleaciones de aluminio agrupadas según los principales elementos en una aleación:	
Cobre	2xxx
Manganeso	3xxx
Silicio	4xxx
Magnesio	5xxx
Magnesio y silicio	6xxx
Zinc	7xxx
Otros elementos	8xxx
Series no utilizadas	9xxx

Tabla 3.2: Grupos de aleaciones de aluminio forjado (William, 1998).

3.7. Aleaciones de fundición de aluminio

Las aleaciones de aluminio suelen ser moldeadas por alguno de los tres procesos principales: moldeo en arena, moldeo permanente y fundido de matrices.

El moldeo en arena es el más sencillo y versátil de los procesos de fundición de aluminio. En la figura 3.15 se muestra cómo se construye un molde simple de arena para producir objetos fundidos en arena. El proceso de moldeo en arena suele elegirse para la producción de (1) pequeñas cantidades de vaciados idénticos, (2) moldeos complicados con núcleos complejos, (3) vaciados grandes y (4) fundidos estructurales.

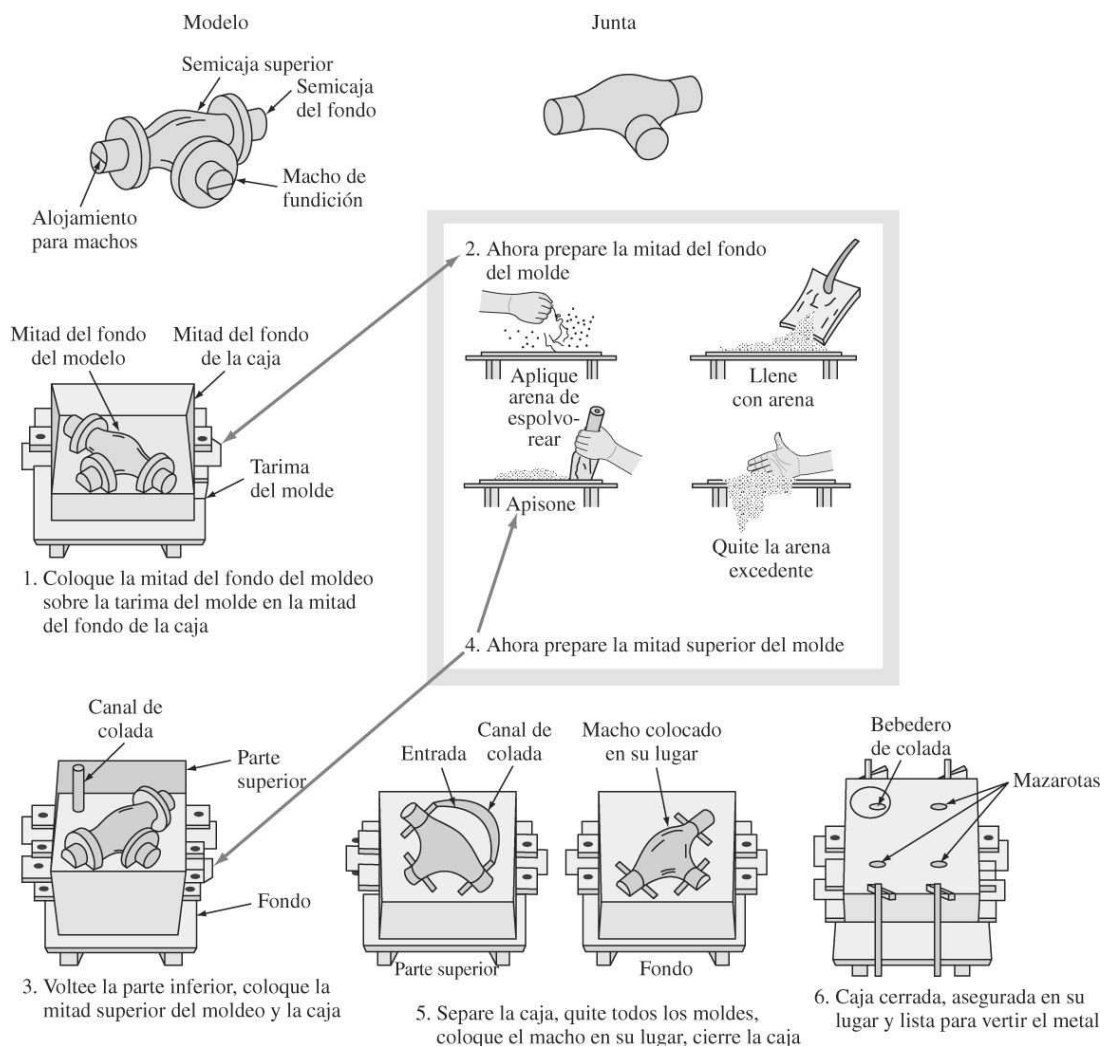


Figura 3.15: Pasos en la construcción de un molde sencillo de arena para hacer un vaciado en arena (William, 1998).

En el vaciado en molde permanente, el metal fundido se vierte en un molde permanente de metal simplemente por gravedad, baja presión o presión centrífuga. En la figura 3.16 se muestra un molde permanente abierto, mientras que en la figura 3.17 se ilustra el vaciado en molde permanente de dos pistones para automóvil hechos de una aleación de aluminio. Los vaciados de la misma aleación y forma, producidos con un molde permanente, tienen una estructura de grano más fina y mayor resistencia que los vaciados hechos en moldes de arena. La velocidad de enfriamiento más rápida del fundido en los moldes permanentes produce una estructura de grano más fino. Además, los fundidos en moldes permanentes suelen tener menor contracción y porosidad producida por gases que en los fundidos en arena. Sin embargo, los moldes permanentes tienen limitaciones de tamaño y las piezas complejas pueden ser difíciles o imposibles de vaciar utilizando un molde permanente.

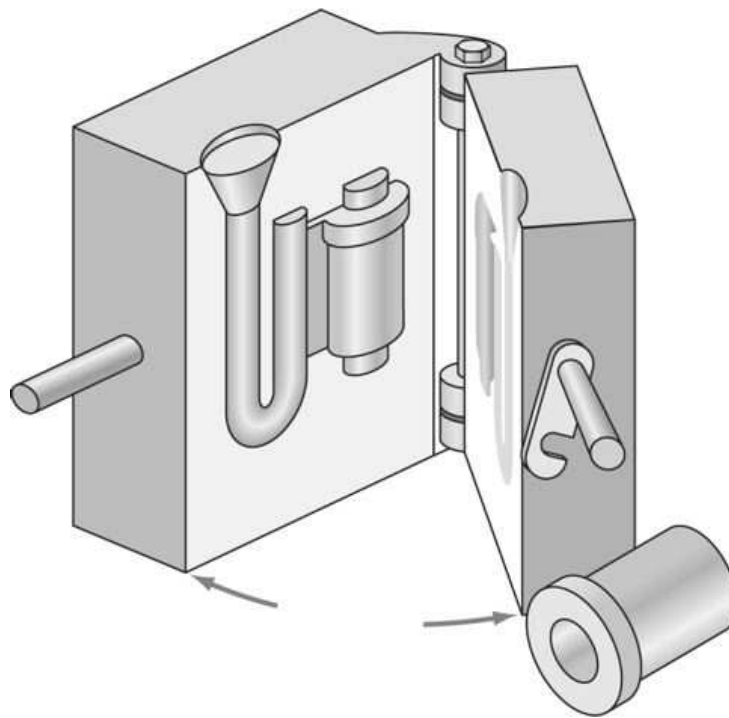


Figura 3.16: Molde permanente o coquilla para fundición. En la mitad izquierda del molde se muestra la colada solidificada con la entrada y el núcleo de metal. El producto acabado se muestra delante del molde (William, 1998).

En el *fundido de matrices*, partes idénticas se funden a velocidades de producción máximas, introduciendo el metal fundido en los moldes de metal bajo una presión considerable. Las dos mitades del troquel del metal se arman y se aseguran juntas para que resistan la alta presión.



Figura 3.17: Coquilla para la fundición simultánea de dos pistones de aleación de aluminio (William, 1998).

El aluminio fundido es forzado a fluir dentro de las cavidades de las matrices. Cuando el metal se ha solidificado, las matrices se sueltan y se abren para extraer la pieza fundida caliente. Las mitades de la matriz se vuelven a unir firmemente y el ciclo de fundido se repite. Algunas ventajas del fundido de matrices son (1) las partes fundidas por este método salen casi totalmente acabadas y pueden fabricarse con altas velocidades de producción, (2) las tolerancias dimensionales de cada parte fundida pueden mantenerse con mayor precisión que con ningún otro proceso de fundición importante, (3) es posible obtener superficies tersas en las piezas fundidas, (4) el enfriamiento rápido de la fundición produce una estructura de grano fino y (5) el proceso se puede automatizar fácilmente.

Se han desarrollado aleaciones de aluminio que ofrecen cualidades de fundición tales como fluidez y facilidad de vertido, además de propiedades tales como solidez, ductilidad y resistencia a la corrosión. Por lo tanto, tienen composiciones químicas muy diferentes a las de las aleaciones de aluminio forjado. En Estados Unidos, esas aleaciones se clasifican según el sistema de la Aluminum Association. En este sistema, las aleaciones de aluminio de fundición se agrupan en función de los principales elementos que contienen en aleación, empleando un número de cuatro dígitos con un punto entre los dos últimos dígitos, como

puede verse en la lista de la tabla 3.3

El silicio, en el rango de 5 a 12 por ciento aproximadamente, es el elemento de aleación más importante en las aleaciones de aluminio de fundición pues aumenta la fluidez del metal fundido y la facilidad con que se puede alimentar dentro del molde, y también refuerza al aluminio. El magnesio en el rango de 0.3 a 1 por ciento se adiciona para incrementar la resistencia, sobre todo mediante el endurecimiento por precipitación durante el tratamiento térmico. El cobre, en el rango de 1 a 4 por ciento aproximadamente, se añade también a algunas aleaciones de aluminio de fundición para aumentar la resistencia, sobre todo a altas temperaturas. Asimismo, otros elementos de aleación, como el zinc, estaño, titanio y cromo, se agregan a algunas aleaciones de aluminio de fundición.

Aluminio, 99.00% como mínimo o más	1xx.x
Aleaciones de aluminio agrupadas según los principales elementos aleados:	
Cobre	2xx.x
Silicio con cobre y/o magnesio agregado	3xx.x
Silicio	4xx.x
Magnesio	5xx.x
Zinc	7xx.x
Estaño	8xx.x
Otros elementos	9xx.x
Series no utilizadas	6xx.x

Tabla 3.3: Grupos de aleaciones de aluminio fundido (William, 1998).

En algunos casos, si la velocidad de enfriamiento del vaciado solidificado en el molde es suficientemente rápida, se puede producir una aleación térmicamente tratable en estado sólido sobresaturado. Por tanto, los pasos de tratamiento térmico y templado de la solución se pueden omitir para el endurecimiento por precipitación de la colada, y sólo se necesita el envejecimiento ulterior de ésta después que se ha quitado del molde. Un buen ejemplo de la aplicación de este tipo de tratamiento térmico se encuentra en la producción de pistones para automóvil endurecidos por precipitación. Los pistones ilustrados en la figura 3.17, después de sacados del molde, sólo necesitan un tratamiento de envejecimiento para endurecerlos por precipitación. Este revenido por tratamiento térmico se denomina T5.

El sistema de designación y las especificaciones para aleaciones de aluminio fundido son similares en algunos aspectos a la de las aleaciones de forjado. El sistema de designación de aleación de fundición también tiene cuatro dígitos y el primer dígito especifica el principal componente de la aleación. Sin embargo, se utiliza un punto decimal entre el tercer y

cuarto dígitos para dejar claro que se trata de designaciones utilizadas para identificar las aleaciones en forma de piezas moldeadas o lingotes de fundición.

Una letra antes de la designación numérica indica una modificación de la aleación original o un límite de impureza. Estas letras de serie se asignan en orden alfabético empezando por A, pero omitiendo I, O, Q y X, siendo X reservada para aleaciones experimentales. El grupo de aleación de fundición se muestra como: 1xx.x-Al puro (99,00 % o mayor), aleaciones 2xx.x Al-Cu; 3xx.x de Al-Si + Cu y / o Mg; 4xx.x de Al-Si; 5xx.x Al-Mg; 7xx.x - Al-Zn; 8xx.x-Al-Sn; 9xx.x-Al+Otros elementos y series 6xx.x sin usar.

3.8. Aleación de aluminio 6082-T6

Las aleaciones del grupo 6xxx se han estudiado exhaustivamente debido a su importancia tecnológica y su excepcional incremento de resistencia cuando se produce un endurecimiento por precipitación (Mrówka-Nowotnik et al., 2006).

Como se vio en la sección 3.6.1], *Aleaciones de aluminio forjado*, las aleaciones del grupo 6xxx pertenecen al grupo de aleaciones de forja. Sus principales elementos aleantes son *silicio* y *magnesio*, que se encuentran aproximadamente en las proporciones requeridas para la formación de siliciuro de magnesio (Mg_2Si), compuesto que las hace tratables térmicamente (Castro Patiño, 2014). En la tabla 3.4 puede verse la composición química de esta aleación.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Al
0.7-1.3	0.0-0.5	0.0-0.1	0.4-1.0	0.6-1.2	0.0-0.2	0.0-0.1	0.0-0.25	Balance

Tabla 3.4: Composición química de la aleación 6082 (% en peso)

Aunque no es tan fuerte como la mayoría de aleaciones 2xxx y 7xxx, las aleaciones de aluminio de la serie 6xxx tienen una buena resistencia a la corrosión ocasionada por el aire, son muy aptas para procesos de extrusión y forja en caliente; además tienen buen comportamiento para ser trabajadas en procesos de deformación en frío y adquieren una excelente textura en procesos de anodizado. Los grados de aluminio en este grupo tratable térmicamente se pueden formar en el revenido T4 (Tratamiento térmico de solución pero no térmico de precipitación) y reforzarse después de la formación completa de las propiedades T6 por tratamiento térmico de precipitación (Castro Patiño, 2014).

El tratamiento térmico T6 es un tratamiento de solución, temple y maduración artificial que requiere de un proceso de disolución, temple y maduración artificial, que proporciona un aumento en la resistencia sin sacrificar de forma notable otras propiedades.

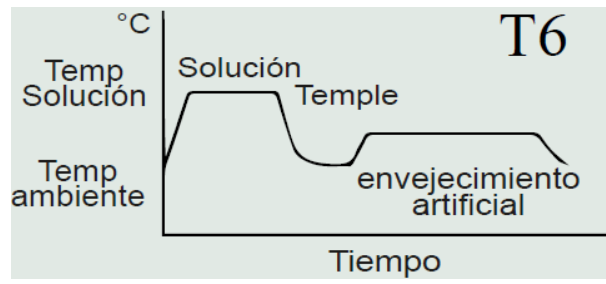


Figura 3.18: Gráfico tratamiento térmico T6 (Obando and Sánchez, 2014).

En este capítulo se desarrollará la metodología experimental seguida para realizar los ensayos de flexión dinámica en tres puntos, describiendo el equipo, la geometría de las probetas y las condiciones de carga.

4.1. Descripción de la máquina

Los ensayos de impacto se llevaron a cabo en el laboratorio dinámico ubicado en el Parque Tecnológico de Leganés, en un lanzador neumático de formas diseñado por VTI a petición del Departamento de Estructuras y Medios Continuos de la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M).

El dispositivo experimental está constituido por una estructura rígida en la que están acoplados todos los elementos de la máquina y un soporte inferior para el posicionado de los especímenes a ensayar. El conjunto impactador es guiado por un conjunto de rodamientos y además cuenta con un sistema de frenado antirrebote para asegurar que durante la realización de los ensayos se produzca un único impacto sobre la probeta ensayada. Además para facilitar el montaje y desmontaje de la máquina se ha fabricado un pórtico auxiliar.

4.1.1. Descripción general

La máquina utilizada es un lanzador de formas de tecnología neumática montado en una estructura para situar el lanzador en posición vertical, con un soporte inferior para la

colocación de las probetas de ensayo y un sistema de guiado y frenado del que se muestra un esquema en la figura 4.1.

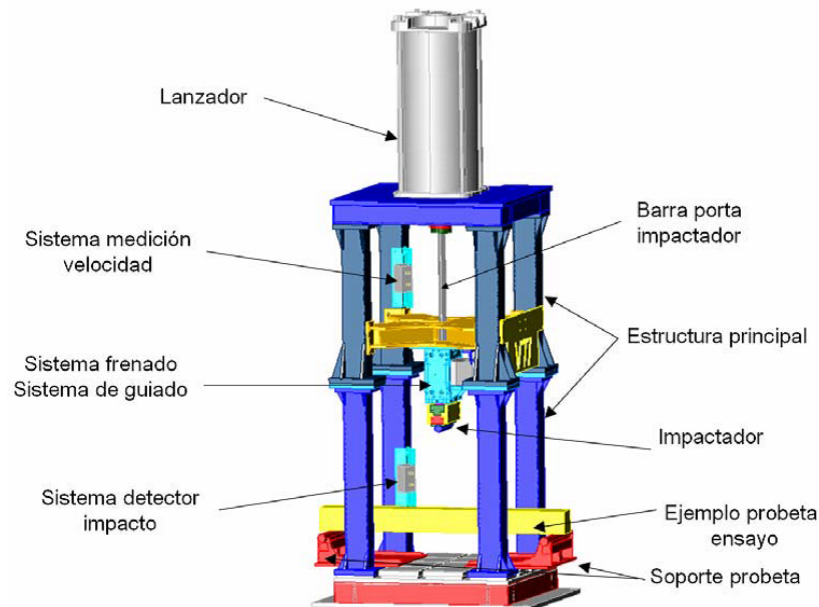


Figura 4.1: Descripción de los diferentes subsistemas que consta el sistema de ensayo.

El lanzador se utiliza para impulsar el conjunto impactador (barra porta impactadores e impactador) hasta la velocidad deseada. El conjunto impactador es guiado en todo momento por un conjunto de ocho rodamientos que evitan la rotación del impactador y absorben los esfuerzos laterales que aparecen durante los ensayos (los límites de carga lateral soportados por la máquina están descritos más adelante en el presente manual).

El diseño del conjunto impactador permite el montaje de impactadores de diferentes masas con la misma forma del impactador. La máquina está dotada de un sistema de frenado del conjunto impactador. Dicho sistema asegura que durante la realización de los ensayos únicamente se produce un impacto sobre las probetas ensayadas.

En la parte inferior de la estructura hay una bancada que permite el montaje de utillajes para el posicionamiento de los especímenes de ensayo. La máquina es suministrada con dos soportes para el posicionamiento de los especímenes a ensayar.

4.1.2. Estructura principal

La estructura central cumple las funciones tanto de soporte de los distintos dispositivos de los que consta la máquina como de guiado del impactador hacia la probeta. Con

respecto a su diseño, podemos destacar lo siguiente (ver figura4.2):

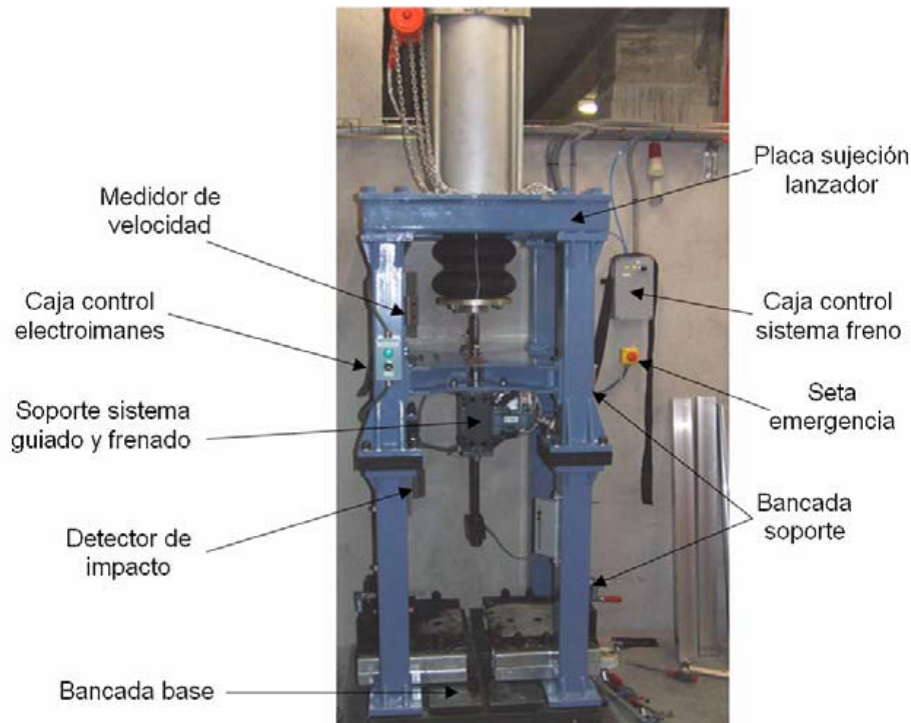


Figura 4.2: Descripción estructura principal del lanzador neumático.

La bancada soporte está formada por 4 columnas atornilladas a la bancada base (16 tornillos M20), diseñada para soportar los esfuerzos generados durante los ensayos. Sus dimensiones son tales que permite alcanzar las velocidades de impacto acorde lo descrito en el pliego de prescripciones técnicas. En la parte superior se fija la placa de sujeción del lanzador (16 tornillos de M20).

La bancada base consta de una placa de 20mm de espesor que se utilizó para anclar la máquina al suelo. Sobre esta placa va montada una estructura que sirve de punto de anclaje para la estructura principal (16 tornillos M20) y además una bancada que permite el montaje de soportes para especímenes de ensayo. La sujeción de utillajes y soportes en esta estructura se hace con tuercas tipo T de M20.

4.1.3. Soporte para probetas

El sistema de ensayo va equipado con dos soportes para el posicionamiento de los especímenes de ensayo. Este sistema asegura que los especímenes apoyen únicamente en

tres generatrices, las de los soportes de las probetas y la del impactador. La separación entre los puntos de apoyo del espécimen en los soportes es variable entre 750 y 1000mm.

Es posible ajustar la distancia entre los apoyos, incluso por encima y por debajo de los citados valores, aflojando las tuercas de sujeción de cada uno de los soportes y deslizando cada uno de ellos hasta alcanzar la distancia deseada. Es posible dar la vuelta por completo a los soportes.

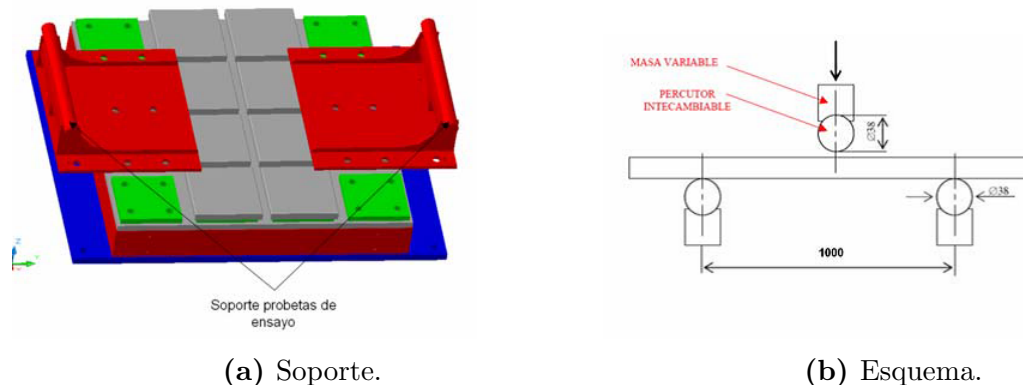


Figura 4.3: Soporte para especímenes de ensayo.

4.1.4. Lanzador

El Sistema de Propulsión está formado por un actuador neumático de baja presión compuesto por los siguientes elementos (ver figura 4.4):

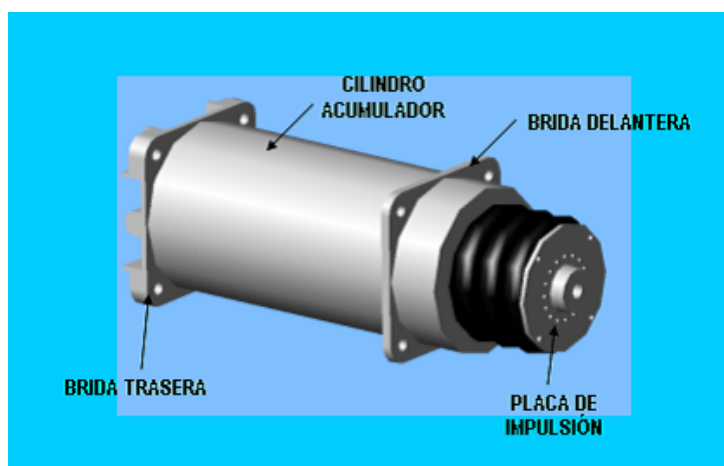


Figura 4.4: Actuador neumático.

- Cilindro-acumulador.
- Brida trasera.
- Brida delantera.
- Placa de impulsión.

4.1.4.1. Cilindro acumulador

Se encarga de almacenar la energía en forma de aire comprimido. El principio básico de funcionamiento es el siguiente:

- El mecanismo de retención bloquea el mecanismo de propulsión.
- El sistema se presuriza hasta una presión determinado, de manera que la energía acumulada en el cilindro es función de dicha presión.
- Una vez se ha alcanzado la presión requerida para obtener la velocidad deseada, el mecanismo de retención se abre, de tal manera que la expansión del aire impulsa la placa que está acoplada al impactador. El sistema asegura el perfecto recorrido del impactador durante su carrera de aceleración mediante un sistema de guiado interno.

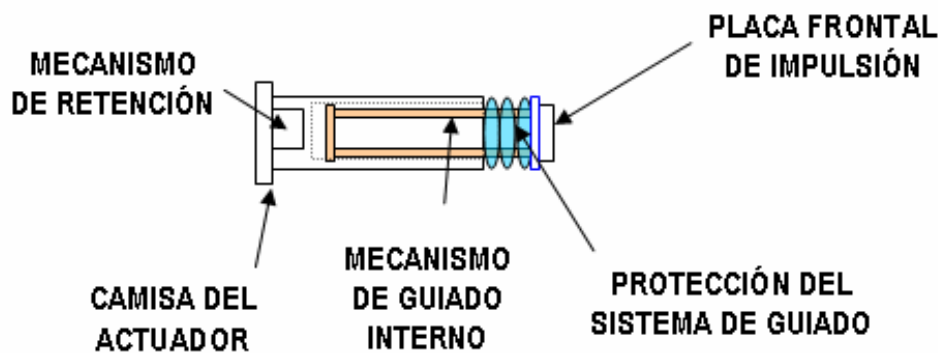


Figura 4.5: Esquema básico interno del lanzador.

Distintas presiones resultarán en distintas energías potenciales dentro del cilindro. Una cierta energía potencial suministrada a un impactador de una masa determinada, resultará en una energía cinética determinada K_i , por tanto una cierta velocidad.

A través de una caracterización previa del sistema, se genera una nube de puntos presión-energía cinética. Estos datos son almacenados en el programa del sistema de control.

Todas las operaciones neumáticas son realizadas de manera automática por el sistema de control, o comandadas directamente por el técnico desde la pantalla de mantenimiento del software. Se puede caracterizar el sistema en cualquier punto válido dentro de los límites de **500 J** y **8 m/s**.

4.1.4.2. Bridas delantera y trasera

El actuador neumático se fija a la placa superior de la estructura a través de cuatro tirantes roscados que sobresalen de la brida delantera.

La brida trasera dispone de 4 tomas de aire que permiten el comando y presurización del sistema.

4.1.4.3. Placa de impulsión y empujador

La placa de impulsión es la encargada de acelerar al impactador. Para ello en la parte delantera de la placa de impulsión se coloca un empujador que sirve de interfaz entre la placa de impulsión y la barra porta impactadores (ver figura 4.6).

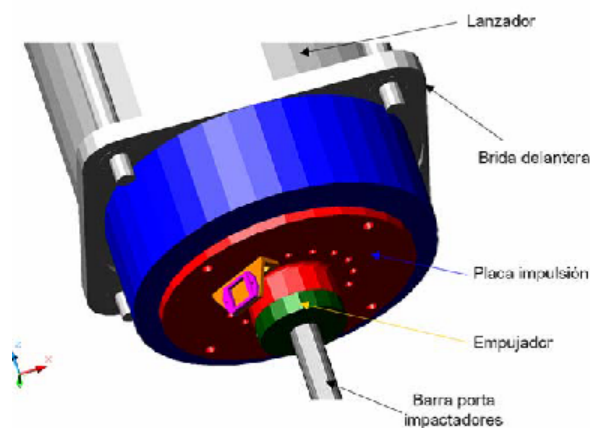


Figura 4.6: Detalle placa impulsión y empujador de la barra porta impactadores.

Durante la carrera de aceleración del lanzador, el empujador transmite el movimiento de avance de la placa de impulsión a la barra porta impactadores. Una vez el lanzador deja de acelerar la barra, el empujador queda liberado, y cada una de las mitades del empujador se queda colgando de los cables sujetos a la estructura principal.

De este modo deja libre el orificio central que hay en la placa de impulsión, permitiendo que la barra porta impactadores pueda penetrar en el lanzador en su movimiento vertical.

ascendente posterior al impacto, evitando dañar el lanzador y la propia barra.

4.2. Sistema de frenado.

El equipo de ensayo incorpora un sistema de frenado para detener el conjunto impactador una vez se ha producido el primer impacto, de este modo se asegura que en los especímenes ensayados únicamente se produce un impacto y no hay rebote del impactador sobre el objeto ensayado. El freno es de tipo pinza de seguridad y está actuado de modo neumático.

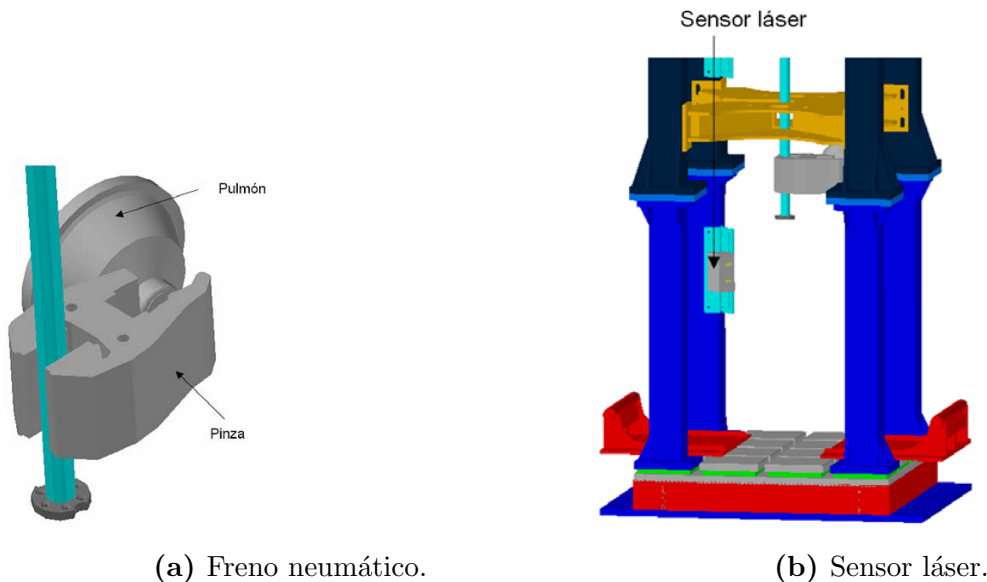


Figura 4.7: Detalle del freno neumático y de la localización del sensor láser.

Al ser un freno de seguridad es necesario que haya presión en el sistema neumático para que se pueda abrir la pinza, es decir, que su posición de reposo natural es con la pinza cerrada, y únicamente al introducir aire a presión en el pulmón se produce la apertura de la pinza. Una vez el sistema neumático ha alcanzado la presión necesaria (5 bares aproximadamente) el freno se abrirá automáticamente a no ser que el sistema freno esté en modo “freno preparado SI” y el haz láser esté cortado.

La señal de cierre de pinza se hace con un retardo de modo que se bloquee el movimiento del conjunto impactador una vez el primer impacto ha finalizado y el conjunto impactador se desplaza verticalmente hacia arriba.

4.2.1. Conjunto impactador

El conjunto impactador se compone de la barra porta impactador y el impactador.

La barra porta impactador se apoya en la parte posterior en el empujador (ver punto 4.1.4.3, Placa de impulsión y empujador), mientras que en el otro extremo se atornilla el conjunto impactador.

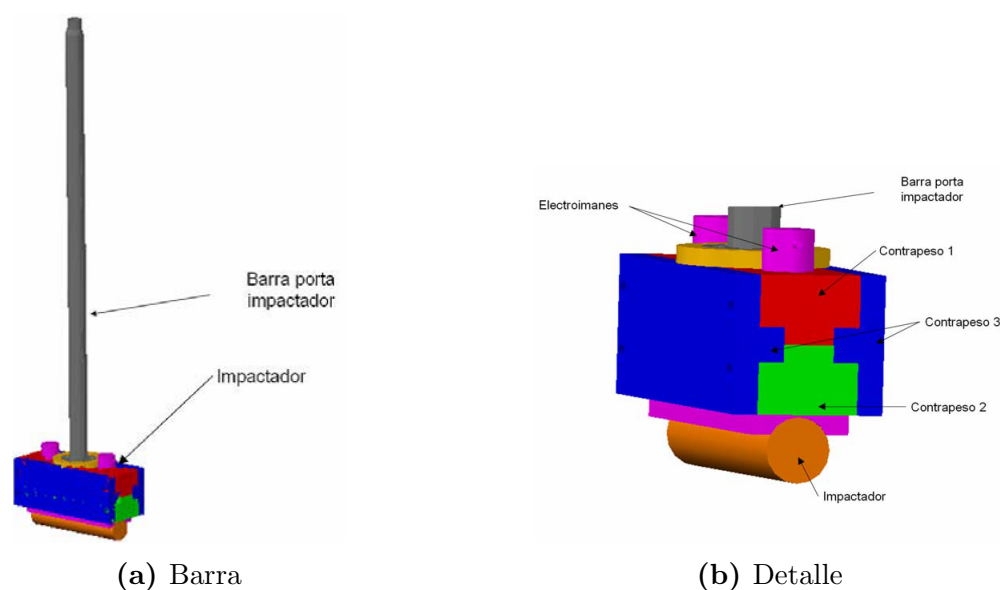


Figura 4.8: Conjunto impactador.

La barra porta impactador tiene forma cilíndrica sobre la que se han fresado cuatro caras planas perpendiculares entre sí. Estas caras sirven de pista para el sistema de guiado ubicado en la estructura principal (se describe en detalle más adelante) haciendo las funciones de guía del impactador.

El conjunto impactador está diseñado para poder utilizar impactadores con diferentes configuraciones de masa manteniendo siempre la misma forma del impactador (diámetro $\phi 38\text{mm}$, longitud 180mm) y la misma barra porta impactadores. En la figura 4.8 se muestra la configuración de mayor peso, que es de aproximadamente 16 kg , si bien dependiendo del tipo de contrapeso se pueden utilizar las siguientes configuraciones de masa total del conjunto de impactador.

Peso conjunto impactador (kg)	7.4	9.4	11.4	16.4
Contrapeso utilizado	Config base	Contrapeso 1	Contrapeso 1+2	Contrapeso 1+2+3

Tabla 4.1: Distintas configuraciones de impactador

4.2.1.1. Medición de la aceleración

En el interior del impactador existe un acelerómetro uniaxial que se encarga de registrar la aceleración durante el impacto. Hasta el impactador llega un cable para la alimentación y lectura del acelerómetro. La señal registrada por el acelerómetro es utilizada por el software para calcular el desplazamiento.



Figura 4.9: Detalle del cable del acelerómetro instalado en la cabeza del impactador.

4.2.2. Sistema de medida de velocidad

El sistema de Medida de Velocidad mide la velocidad de la placa de impulsión un instante antes de ser frenada.

El Sistema de Medida de Velocidad está formado por los siguientes elementos:

- Dos láseres de tecnología emisor receptor.
- Espejo de reflexión.

Los láseres de medición están montados en una caja que se fija a una de las columnas superiores de la estructura principal mediante dos tornillos de M8.

El espejo reflector se fija a la placa de impulsión mediante una pieza específica diseñada al efecto y que se fija placa impulsora del lanzador mediante dos tornillos de M8. No se debe cambiar la posición del mismo ya que afectaría a la medición del sensor de velocidad.

Las señales de medida de velocidad de los láseres son utilizadas para iniciar la adquisición de datos de aceleración.

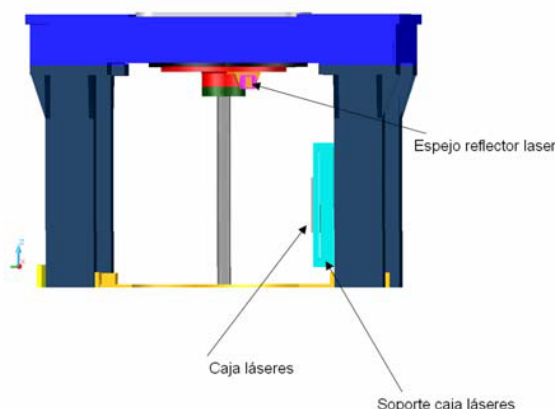


Figura 4.10: Subsistema de medida de velocidad.

4.2.3. Sistema de control

El Sistema de Control tiene como misión la realización de las distintas operaciones para la realización de un lanzamiento, entre las que se incluyen:

- Los cálculos de energía.
- Control del sistema de propulsión.
- Supervisión de las seguridades.

El Sistema de Control (Armario de Control) está integrado en un armario que consta de los siguientes elementos:

- PC industrial, con teclado y ratón.
- Tarjetas de adquisición y control.
- Tarjeta del medidor de velocidad.
- Elementos de medida de presión.
- Interruptor de emergencia.

- Interruptor de puesta en marcha.
- Señales luminosas de sistema activo o sistema desactivado.

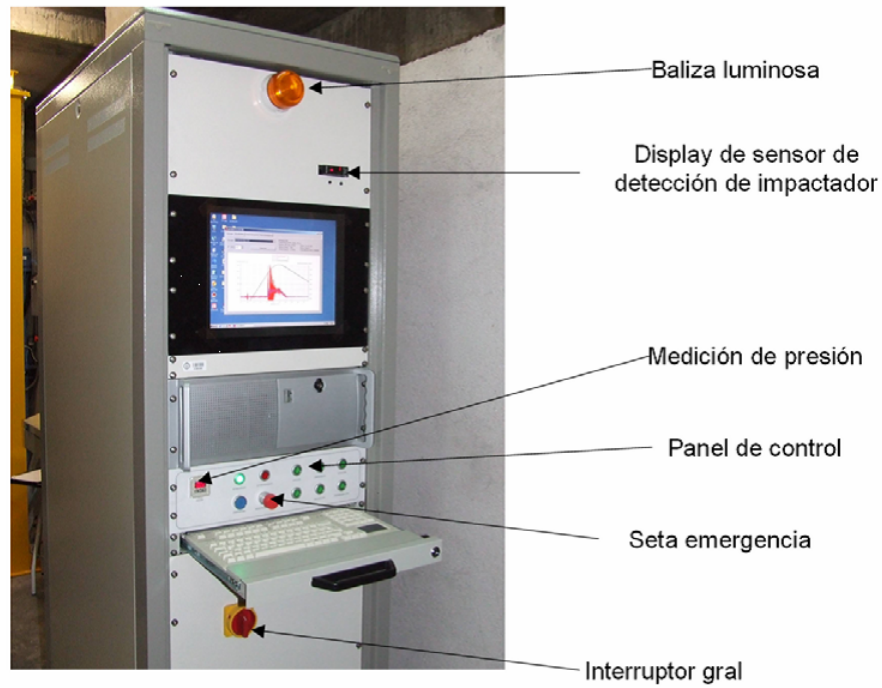


Figura 4.11: Armario de control.

4.3. Ensayos experimentales

4.3.1. Geometría de la probeta

La geometría de la probeta seleccionada es tubular de sección cuadrada fabricada en aluminio 6082-T6 de 750mm de longitud. La sección tiene un ancho de cara de 40 mm y su espesor es de 4mm (Figura 4.12). Este valor de espesor es elevado en comparación con los ensayos experimentales existentes en la literatura (ver Kecman (1983)). Sin embargo, se ha considerado necesario dentro del marco de este estudio emplear este valor para tener datos experimentales de partida con los que poder comparar en futuros trabajos.

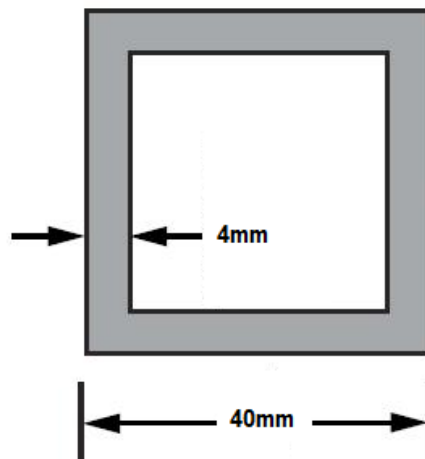


Figura 4.12: Dimensión de la sección transversal de los tubos de aluminio.

4.3.2. Disposición experimental

Las probetas tubulares se encuentran simplemente apoyadas sobre dos apoyos tubulares situados a una distancia de 500 mm uno con respecto al otro, siguiendo la metodología habitual en ensayos de flexión en tres puntos (Ver figura 4.13). Esta distancia es la máxima alcanzable dada la geometría del dispositivo y lo suficientemente lejana a los extremos del tubo como para evitar posibles problemas de deslizamiento durante el ensayo dinámico.

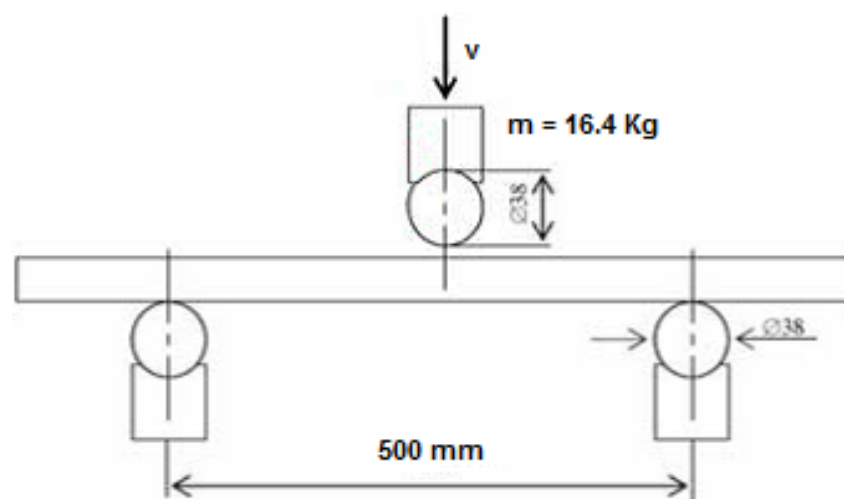


Figura 4.13: Esquema del ensayo dinámico de flexión en tres puntos.

4.3.3. Selección de los parámetros del ensayo

Dado que el espesor de las probetas tubulares es elevado, se ha optado por emplear durante el ensayo los tres juegos de contrapesos disponibles (ver figura 4.14, de tal manera que la masa final del dispositivo es de 16.4 Kg.



Figura 4.14: Configuración del peso del impactador para los ensayos de flexión dinámica en tres puntos.

Con respecto a la velocidad del impactador, se ha optado por elegir en primer lugar la máxima velocidad alcanzable por el dispositivo, para posteriormente reducir su valor

y obtener datos suficientes para poder comparar. En este sentido, se han elegido unas velocidades de 6 y 8 m/s. En la figura 4.15 se puede ver el momento en que el impactador golpea el tubo. Los datos recogidos durante el ensayo se mostrarán y analizarán en el capítulo correspondiente.

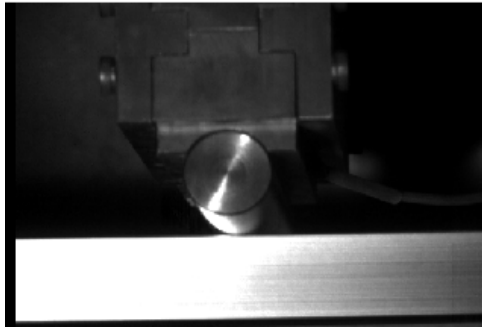


Figura 4.15: Momento en que el impactador golpea el tubo durante el ensayo dinámico de flexión en tres puntos.

5.1. Introducción

Se entiende por Vídeo Tracking al proceso de localización de un objeto en movimiento (o varios) y su posterior seguimiento en el tiempo mediante el uso de cámaras de vídeo. Los sistemas visuales de seguimiento tienen dos componentes principales: representación y localización del objetivo, y filtrado de la información asociada (Paredes, 2011).

Se ha demostrado que si se pueden controlar posibles fuentes de error como pueden ser proyecciones, distorsiones en la lente o fallos al rastrear la posición, es posible conseguir medidas de gran precisión utilizando este tipo de software (Page et al., 2008). Sirisathitkul et al. grabaron una bola hundiéndose en glicerol y comprobaron que los valores obtenidos mediante análisis de vídeo son totalmente compatibles con las ley de Stokes (Sirisathitkul et al., 2013).

Es por este motivo por el cual se decidió grabar los ensayos experimentales empleando una cámara de alta velocidad (uya denominación se proporciona posteriormente). Estos vídeos permiten analizar, al menos de manera cualitativa, los resultados experimentales proporcionados por el acelerómetro del impactador y comparar posteriormente con las simulaciones numéricas realizadas.

5.2. Software empleado

En el presente proyecto se ha decidido utilizar Tracker para llevar a cabo el análisis de vídeo. Tracker es un programa gratuito de análisis de video diseñado en el ambiente Java del proyecto Open Source Physics (OSP, Física de Código Abierto) , cuya mayor utilidad

es la posibilidad de definir un conjunto de elementos dentro de un fotograma y que el propio programa “rastree” la trayectoria que siguen esos puntos, fotograma a fotograma, durante todo el intervalo del vídeo que hayamos definido.

La principal ventaja de este software, y por la que se ha decidido su uso en el presente proyecto, es la de tratarse de un código abierto y gratuito. Existen otras muchas herramientas específicas, o bien como utilidades dentro de programas matemáticos (como las toolboxes de Matlab), pero la gran mayoría son de pago.

La cámara utilizada para grabar los ensayos es una cámara de alta velocidad FASTCAM-APX RS model 250K. Los ensayos se grabaron a 10000 fps.

La utilización de una cámara de alta velocidad permite registrar un gran número de frames en un evento dinámico, de tal manera que posteriormente puede analizarse el vídeo para extraer información adicional o complementaria.

5.3. Análisis

El software de video tracking Tracker permite obtener los valores de posición de cada frame de un punto concreto del dispositivo, lo que permite no sólo extraer datos del propio desplazamiento si no datos de velocidad y aceleración del impactador durante el ensayo de flexión dinámica en tres puntos.

Se ha utilizado Tracker para obtener los valores de posición, velocidad y aceleración del impactador durante los dos ensayos de flexión dinámica en tres puntos, a partir de los videos de los mismos.

5.3.1. Definición de los parámetros de Tracker

Al tratarse de una superficie metálica, es complicado seleccionar un conjunto de elementos adecuado para rastrear (los reflejos que se producen dificultan esta tarea, ya que el conjunto de elementos en cada fotograma va a variar con respecto al de referencia). Por ello, se ha decidido tomar varias trayectorias de diferentes puntos del conjunto impactador y, como todas pertenecen al mismo sólido rígido y, por tanto, tienen la misma velocidad, trabajar con la media. Los autores son conscientes del error cometido en la utilización de este software para extraer datos concretos. En este sentido, es importante resaltar que el objetivo de este documento no es realizar una metodología exhaustiva y completa de un sistema de seguimiento de puntos fiable; si no más bien utilizar esta herramienta para obtener datos adicionales. Si se quiere obtener datos más fiables, sería necesario cambiar

el enfoque de la cámara, realizar un patrón sobre el impactador o muestra y modificar la iluminación.

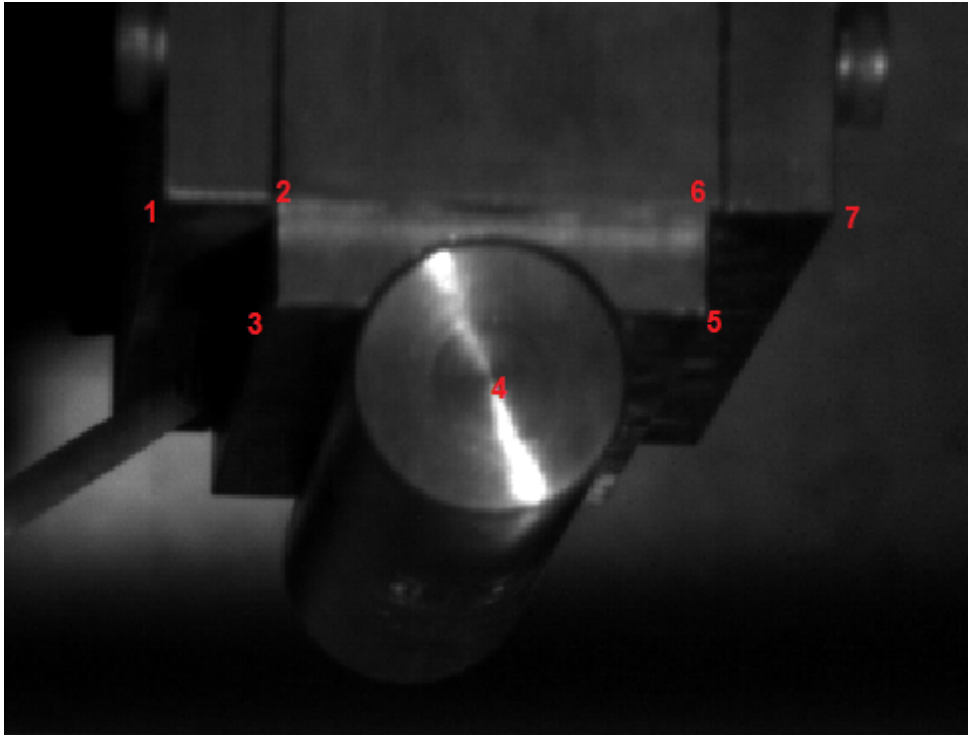


Figura 5.1: Diferentes puntos elegidos como referencias para el rastreo con Tracker.

Los puntos seleccionados se muestran en la figura 5.1 y corresponden a las esquinas de los contrapesos y al punto central del impactador, dado que son los puntos con mayor contraste con el fondo y, por tanto más fácilmente diferenciables.

En cada medición se han definido los ejes de referencia en el punto inicial que queremos rastrear y se ha indicado el ancho del tubo como medida de referencia (figura 5.2).

Tomando de ejemplo la medición en el punto 1 (ver figura 5.3) para el ensayo a 8 m/s, podemos ver en la figura 5.3 la trayectoria seguida por el conjunto de referencia y la aceleración medida por el programa.

Los resultados del análisis con Tracker se mostrarán y analizarán en el capítulo correspondiente.

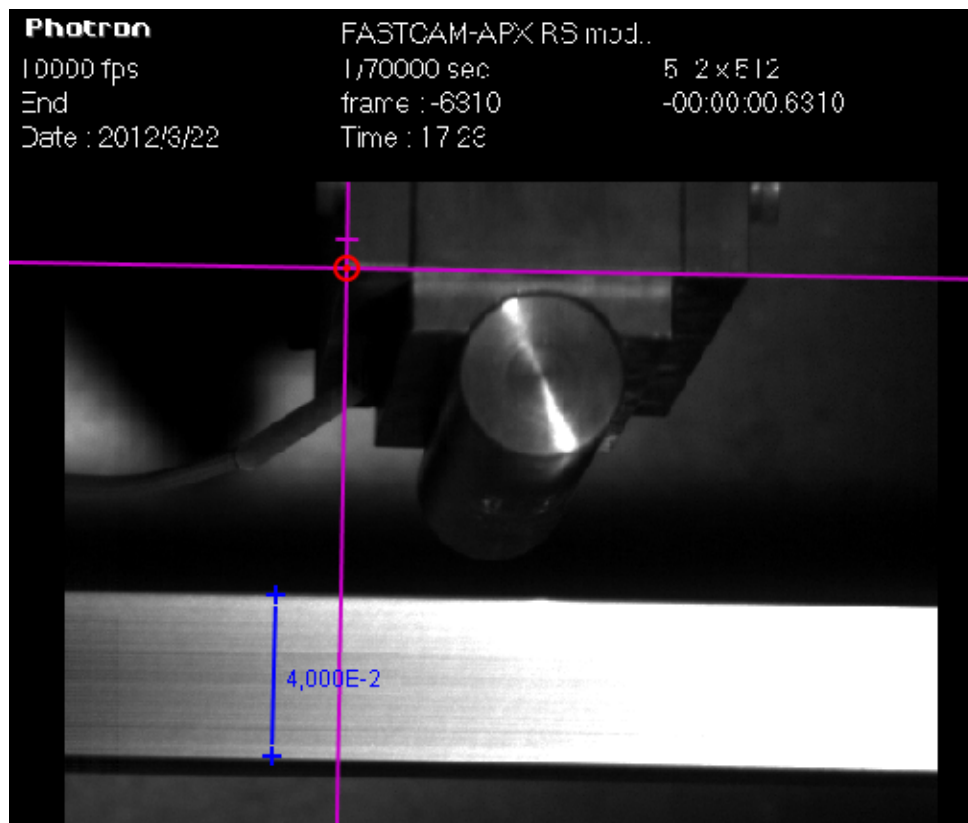


Figura 5.2: Ejes y distancia de referencia.

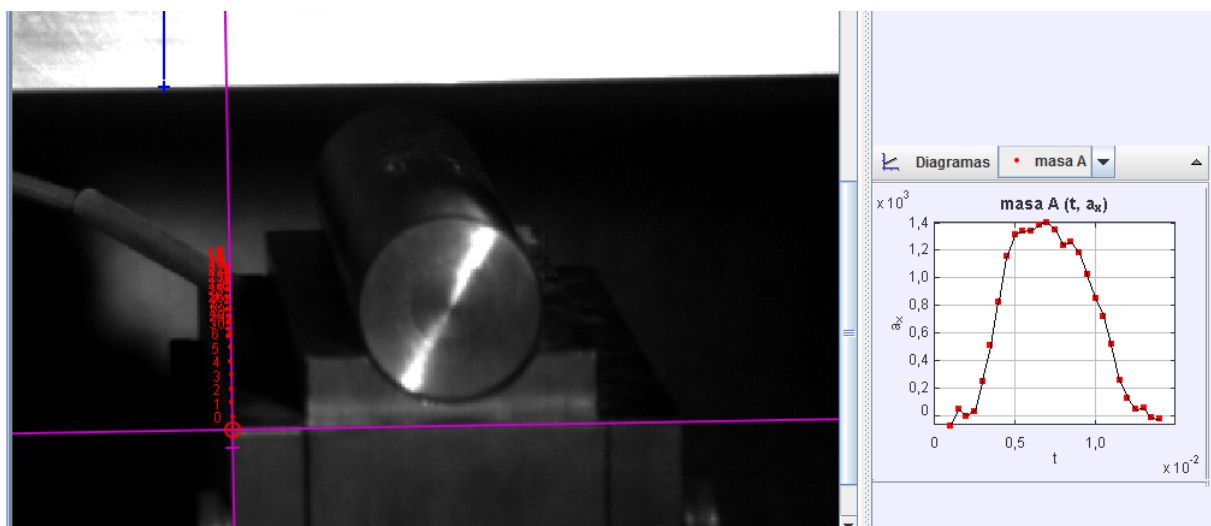


Figura 5.3: Trayectoria seguida por el impactador y aceleración mostrada por Tracker

6.1. Introducción

En la actualidad existen modelos de análisis con un gran potencial de cálculo que permiten reproducir comportamientos estructurales complejos. Estos modelos se basan en la utilización de programas de elementos finitos para llevar a cabo la simulación. Estos métodos llegan a la solución del problema resolviendo ecuaciones diferenciales de la mecánica de medios continuos. Sin embargo, dependen en gran medida de las ecuaciones constitutivas usadas para definir las propiedades de los materiales involucrados en la simulación.

En el presente proyecto se ha utilizado el código de análisis computacional ABAQUS/Explicit, basado en elementos finitos.

6.2. Ecuaciones constitutivas

En mecánica de sólidos y en ingeniería estructural, las ecuaciones constitutivas son igualdades que relacionan el campo de tensiones con la deformación, usualmente dichas ecuaciones relacionan componentes de los tensores tensión, deformación y velocidad de deformación.

Multitud de investigadores han propuestos diferentes expresiones para poder modelar la tensión de deformación que ocurre durante un impacto. De entre todos esos modelos, el de Johnson-Cook es uno de los más utilizados para altas velocidades de deformación (Johnson and Cook, 1983).

El modelo de Johnson-Cook, visto en la ecuación 6.1, describe la tensión de deformación como el producto de la deformación, la velocidad de deformación y los efectos de la temperatura. Este modelo asume que la pendiente de la curva de la tensión de deformación es afectada de forma independiente por el endurecimiento por deformación, la sensibilidad a velocidad de deformación y el ablandamiento por calor; cada uno de ellos representado entre corchetes en la ecuación constitutiva.

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\varepsilon})^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (6.1)$$

En la ecuación 6.1 el parámetro A es la resistencia a fluencia inicial del material a temperatura ambiente. La velocidad de deformación $\dot{\bar{\varepsilon}}$ está normalizada con una velocidad de deformación de referencia $\dot{\bar{\varepsilon}}_0$. T_0 es la temperatura ambiente y T_m es la temperatura de fusión del material, ambas constantes. Mientras que el parámetro n tiene en cuenta el efecto de endurecimiento por deformación, el parámetro m modela el ablandamiento por calor y C representa la sensibilidad a la velocidad de deformación. El modelo de Johnson-Cook es un modelo constitutivo del material con muy buena aceptación y numéricamente robusto, ampliamente utilizado en modelados y estudios de simulaciones.

6.3. Modelado en Abaqus

Los elementos principales del modelo son un tubo de aluminio de sección cuadrada, un impactador de sección circular y dos apoyos también de sección circular. Mientras que el tubo está simplemente apoyado sobre los apoyos, éstos se encuentran totalmente empotrados. El impactador, por su parte, se encuentra situado sobre el tubo y se encuentra totalmente libre.

6.3.1. Partes

6.3.1.1. Tubo

El tubo se ha modelado como un sólido deformable 3D de 750mm de longitud, con una sección transversal cuadrada de 40mm de ancho y 4mm de espesor (ver figura 6.1).

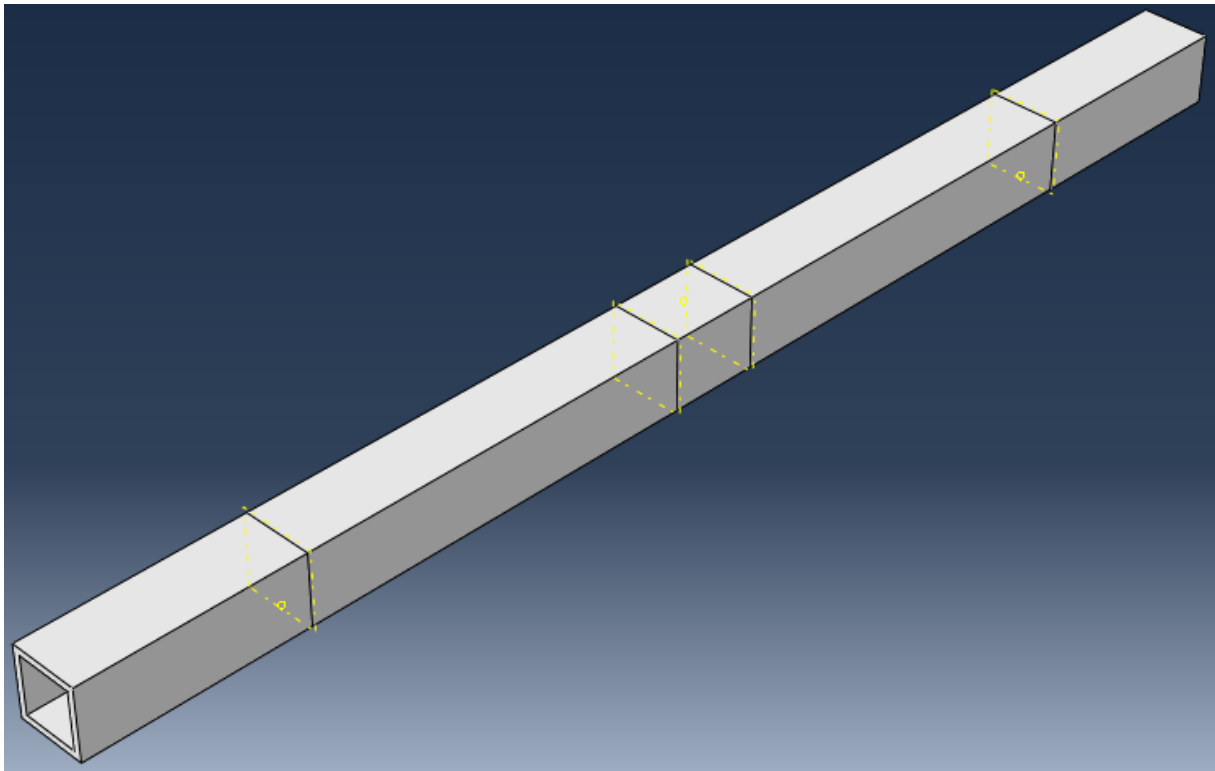


Figura 6.1: Detalle del modelado del tubo en Abaqus.

Las particiones de los extremos servirán para poder ajustar la posición de los apoyos (hay 500mm de separación entre ellas), mientras que la partición central servirá para poder

tener un mallado mucho más preciso en la zona de contacto con el impactador.

Para el mallado se seleccionó un elemento **C3D8T**: un tipo de elemento *Explicit*, de geometría lineal y que pertenece a la familia de elementos *Coupled Temperature-displacement*.

Debido al coste computacional que supone un mallado uniforme, ha sido necesario reducir el mallado inicial y definirlo según las zonas. En la figura 6.2 se puede ver el mallado que se ha aplicado en la sección transversal y en la zona de contacto con el impactador. El mallado se compone de un total de 149400 elementos tipo C3D8T.

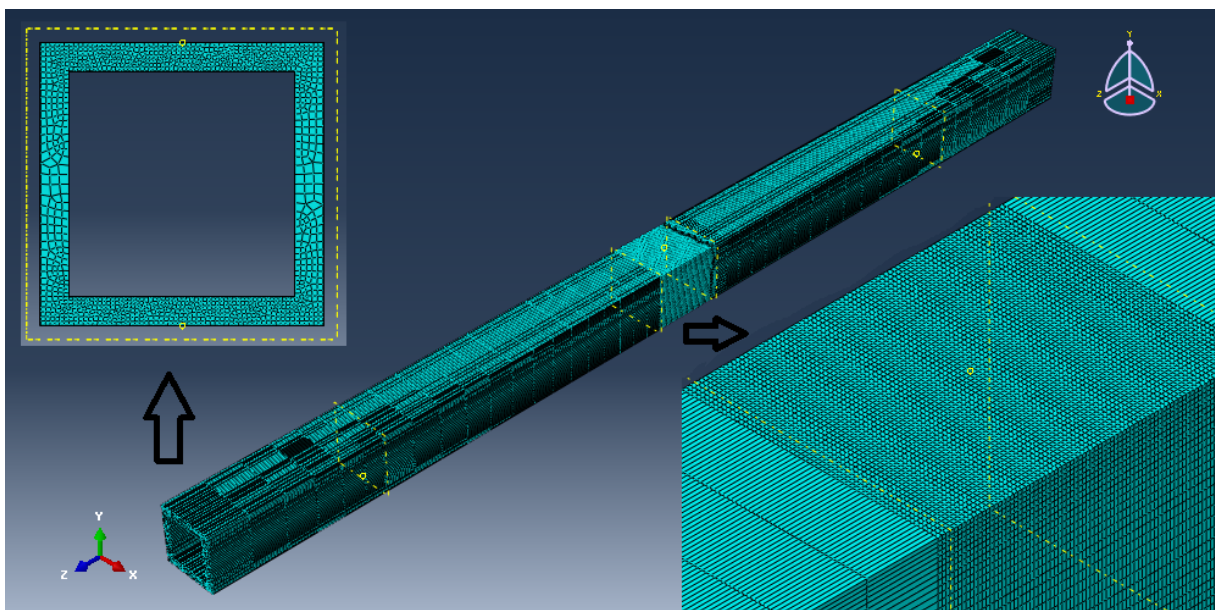


Figura 6.2: Detalle del mallado del tubo en Abaqus.

En la sección transversal se definieron más elementos en las caras superior e inferior por ser las que tienen que soportar un mayor esfuerzo a compresión y a tracción, respectivamente, y es necesario un mayor número de nodos. Mediante un bias se consiguió concentrar un mayor número de nodos en dichas caras, consiguiendo 6 elementos en el espesor, a cambio de sacrificar nodos en las caras laterales, donde se alcanza un mínimo de tres.

En la partición central, dado que es la que va a soportar el golpe del impactador, se han definido un número mayor de nodos, para poder calcular mejor el comportamiento del tubo tras el impacto.

6.3.1.2. Apoyos

Los apoyos se modelaron como un sólido rígido discreto de 200mm de longitud con una sección transversal que consiste en un medio arco de radio de 19mm (ver figura 6.3). Se ha considerado que los apoyos son mucho más rígidos que el aluminio del tubo, por lo que no van a experimentar deformación plástica. Esto es una hipótesis común en estos modelos, y ha sido verificada en el ensayo experimental, en el que no se ha observado deformación permanente ni en los apoyos ni en el impactador. El punto de referencia se ha colocado en el centro de masas del elemento.

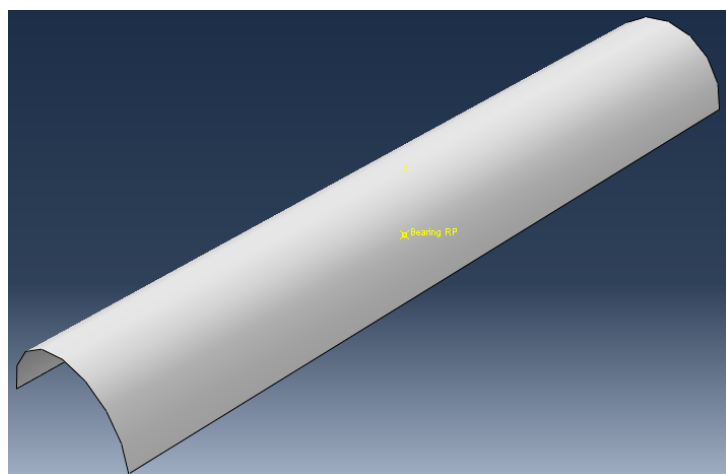


Figura 6.3: Detalle del modelado del apoyo en Abaqus.

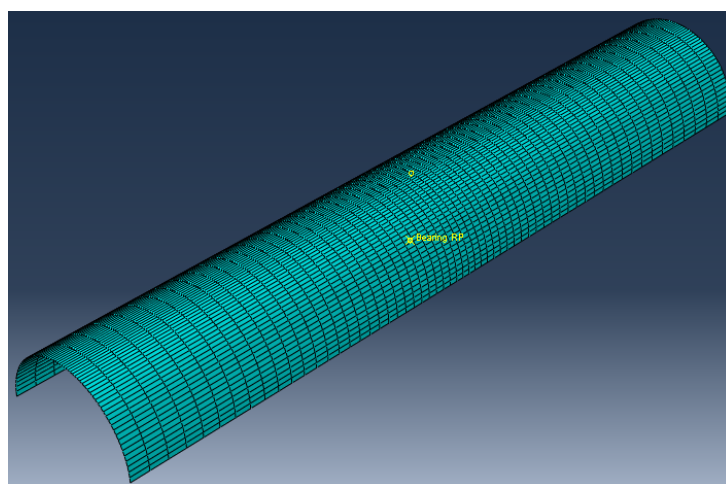


Figura 6.4: Detalle del mallado del apoyo en Abaqus.

Con respecto al mallado, se ha optado por un mallado con un ligero bias tanto longitudinal como transversalmente (ver figura 6.4). El elemento seleccionado ha sido **R3D4**, lineal, *Explicit* y de la familia de elementos *Discrete Rigid Element*. El mallado se compone de un total de 3600 elementos tipo R3D4.

6.3.1.3. Impactador

Por la misma justificación que en el caso de los apoyos, el impactador se ha modelado como un sólido rígido discreto de 180mm de longitud y una sección transversal que consiste en medio arco de 19mm de radio (ver figura 6.5).

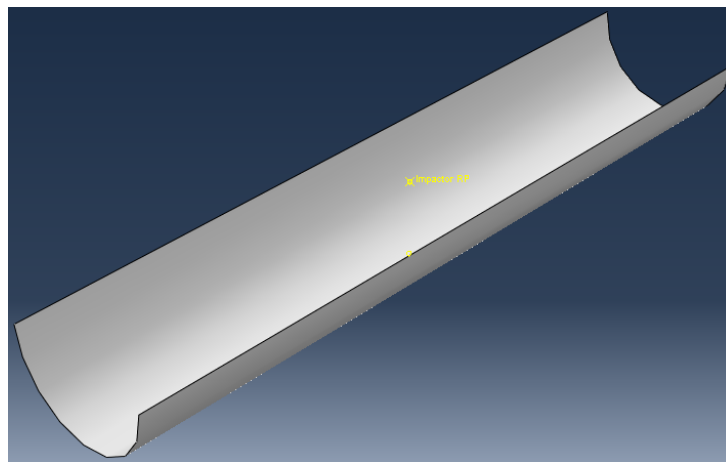


Figura 6.5: Detalle del modelado del impactador.

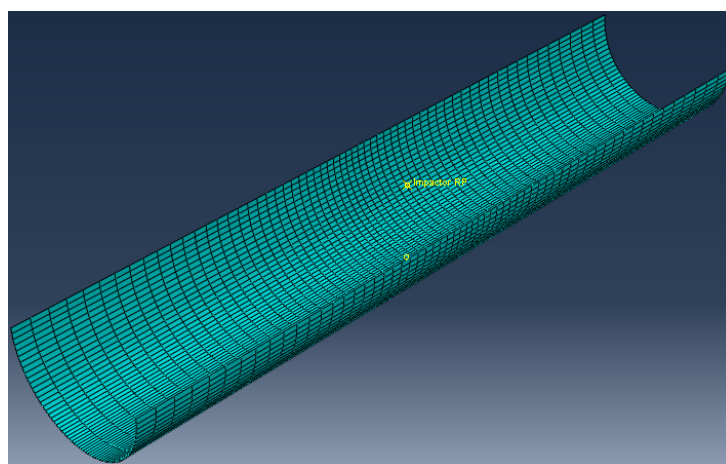


Figura 6.6: Detalle del mallado del impactador en Abaqus.

El punto de referencia se situó en el centro de masas del impactador.

Igual que en el caso de los apoyos, se ha optado por un mallado con ligero un bias tanto longitudinal como transversalmente (ver figura 6.6). El elemento seleccionado ha sido **R3D4**, lineal, *Explicit* y de la familia de elementos *Discrete Rigid Element*. El mallado se compone de un total de 3600 elementos tipo R3D4.

6.3.2. Material

La descripción de las propiedades del material atañe exclusivamente a la probeta tubular, puesto que, como se ha mencionado, los apoyos y el impactador se consideran indeformables.

En cambio, para el tubo es necesario modelar el material, que en este caso es aluminio 6082-T6. Las propiedades del mismo se pueden ver en la tabla 6.1.

Densidad [Kg/m^3]	2700
Módulo de Young [GPa]	70
Coefficiente de Poisson	0.33
Conductividad [W/mK]	180
Calor específico [J/KgK]	896

Tabla 6.1: Valores para el Aluminio 6082-T6 para Abaqus.

Se ha establecido un endurecimiento por deformación plástica siguiendo el criterio de Johnson-Cook. Los valores para el aluminio 6082-T6 para una **velocidad de deformación** de $10,5 \times 10^3 s^{-1}$ (Jaspers and Dautzenberg, 2002). Dichos valores se muestran en la tabla 6.2.

A [MPa]	B [MPa]	C	n	m	T_m [K]
428.5	327.7	0.00747	1.008	1.31	855

Tabla 6.2: Constantes para el modelo constitutivo de Johnson-Cook (Jaspers and Dautzenberg, 2002).

6.3.3. Consideraciones adicionales del modelo numérico

Como modelo de contacto se ha utilizado contacto general con una propiedad de contacto *penalty*. El valor del coeficiente de rozamiento es de 0.1. No se ha realizado un estudio paramétrico para analizar la influencia de este coeficiente, a pesar de que los

autores son conscientes de que el valor de este parámetro puede tener cierta trascendencia durante el contacto de las partes.

Los apoyos se han empotrado para evitar cualquier giro o desplazamiento, mientras que se ha restringido el giro del impactador en cualquier plano. Al tratarse de sólidos rígidos, no es necesario seleccionar diferentes puntos del elemento, si no que basta con aplicar las coacciones al punto de referencia. El tubo, en cambio, queda libre.

Se ha definido una velocidad inicial en el punto de referencia del impactador, que coincide con su centro de masas. Esta velocidad es la velocidad que alcanza el impactador justo antes del impacto, obtenida mediante el Lanzador Neumático de Formas.

6.3.4. Ensamblaje

Una vez definidos todos los elementos y propiedades, la disposición final es la mostrada en la figura 6.7.

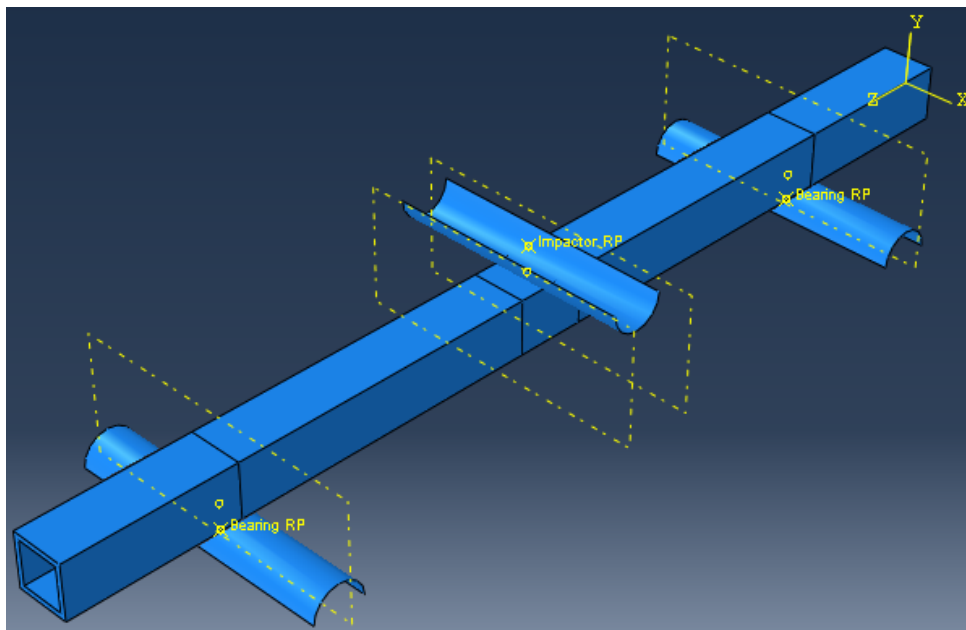


Figura 6.7: Detalle del ensamblaje final del modelo de Abaqus.

Los apoyos se encuentran separados 500mm y el tubo está apoyado sobre ellos, sin ningún tipo de coacción. El Impactador se encuentra situado justo encima del tubo, a la altura de la parte central del mismo (es decir, a 250mm de cada apoyo).

Análisis de los resultados

7.1. Introducción

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos en los ensayos experimentales, de los análisis de vídeo y de las simulaciones numéricas.

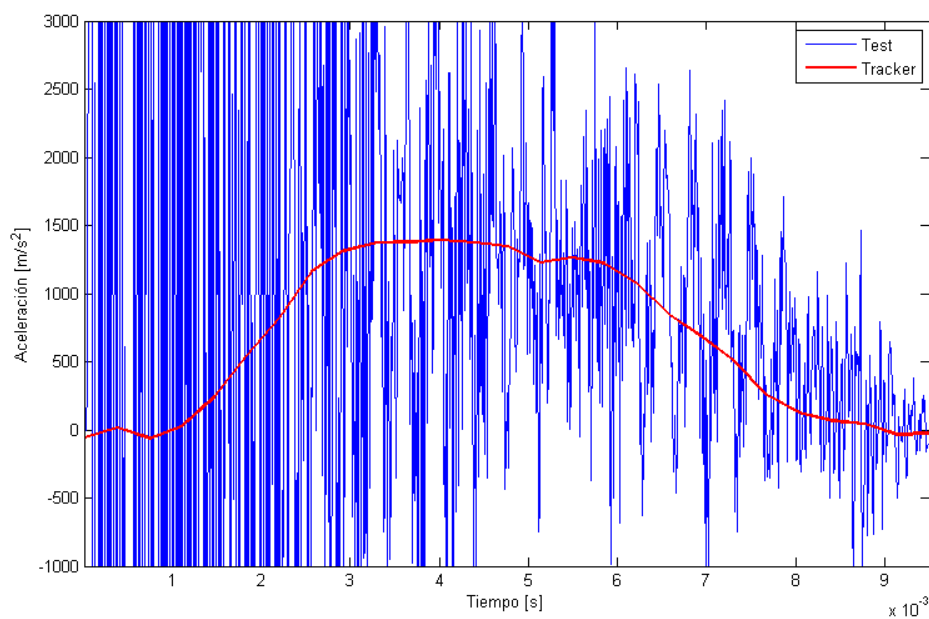
7.2. Evolución de la aceleración del impactador

En la figura 7.1 se muestran las curvas de aceleración obtenidas durante los ensayos experimentales.

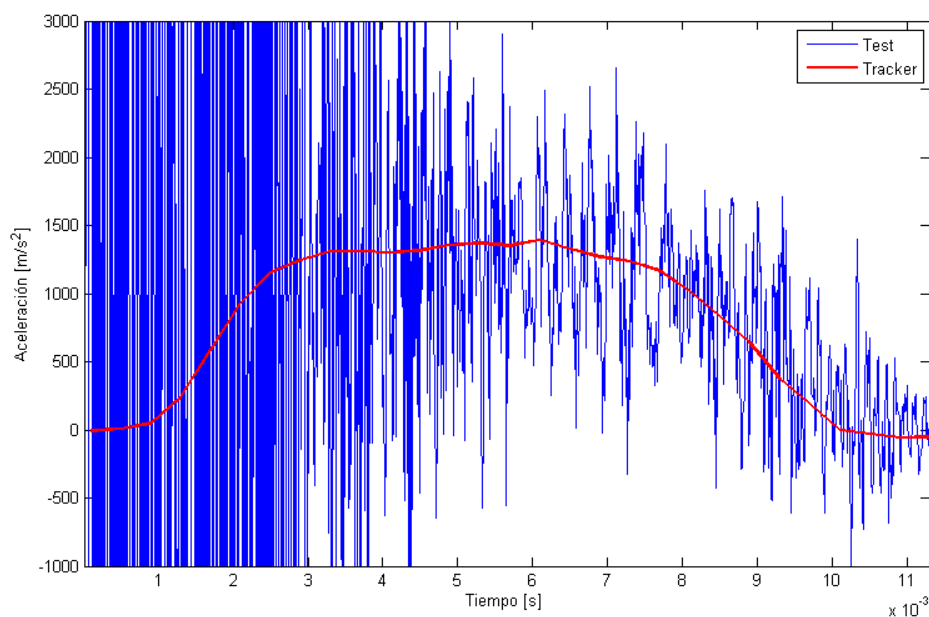
La curva de color azul representa la aceleración medida por el acelerómetro de la máquina de ensayos, mientras que la curva de color rojo representa la aceleración obtenida a través del análisis de vídeo.

Como se puede ver, hay una gran cantidad de ruido en la muestra medida a través del acelerómetro de la máquina de ensayos, especialmente en las zonas cercanas al momento del impacto. Esto puede deberse a un problema en la sensibilidad del acelerómetro, ya que se está trabajando en velocidades cercanas al límite de trabajo de la máquina (ver la sección 4.1, Descripción de la máquina), o incluso a fallos en la propia maquinaria.

A pesar del ruido, es posible apreciar cómo la curva obtenida usando Tracker muestra una evolución similar a la del ensayo.



(a) $V_0 = 6\text{ m/s}$



(b) $V_0 = 8\text{ m/s}$

Figura 7.1: Gráficas de aceleración del impactador durante ensayo de flexión dinámica en tres puntos.

7.3. Evolución de la velocidad del impactador

En la figura 7.2 se muestra la curva de la velocidad del impactador durante los ensayos experimentales.

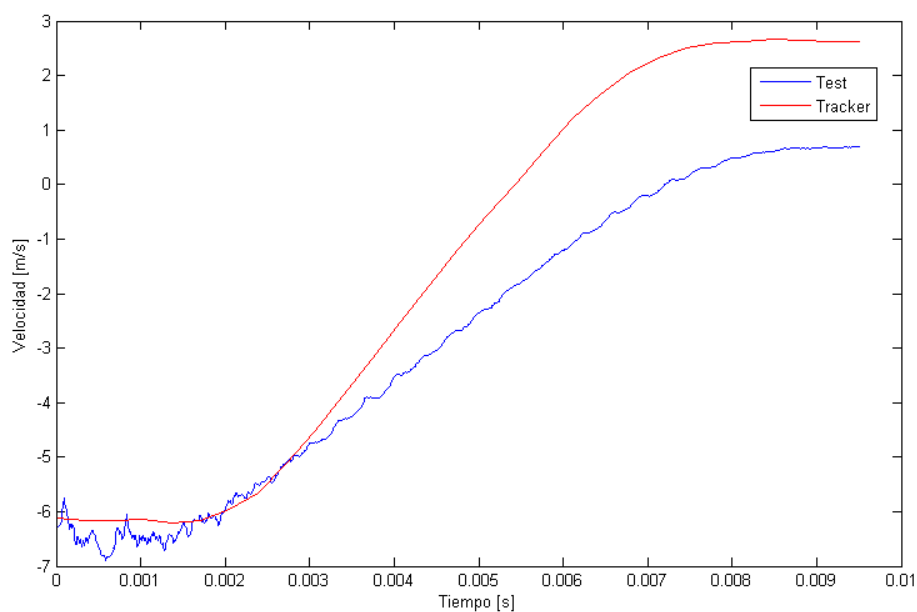
Las curvas rojas representan las velocidades obtenidas mediante el análisis de vídeo, mientras que las azules pertenecen a las obtenidas a través de la máquina de ensayos.

La evolución de las curvas obtenidas con Tracker es la que se puede esperar en un ensayo dinámico de flexión en tres puntos: el impactador avanza con una velocidad inicial negativa hasta que, en el momento de impacto, sufre una aceleración que lo frena hasta detenerse, para a continuación verse impulsado por la recuperación elástica del tubo. Cuando el tubo recupera la elasticidad, el impactador deja de acelerarse y adquiere una velocidad constante, esta vez positiva.

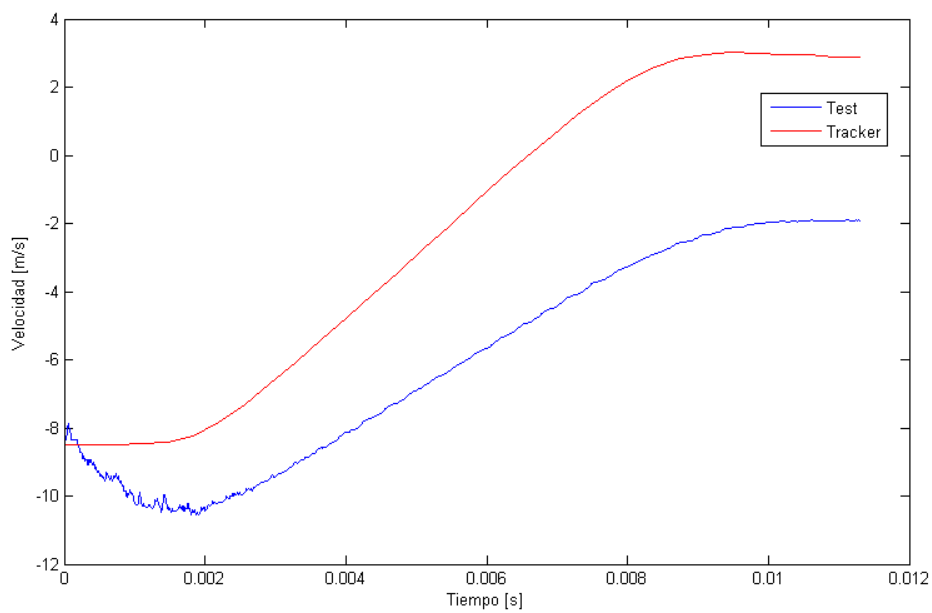
Sin embargo, hay una ligera discrepancia con respecto a los datos registrados por la máquina de ensayos. Si bien en la gráfica del ensayo con una velocidad inicial de 6 m/s la evolución es la misma que se explicó anteriormente, (aunque con una pendiente más ligera y una velocidad menor) la gráfica del ensayo de 8 m/s presenta una serie de incongruencias:

- no mantiene un valor inicial constante, sino que se incrementa hasta los 10 m/s.
- tras el impacto, el valor de la velocidad disminuye, pero en lugar de mantener una evolución que haga que adquiriera un sentido positivo por la acción de la recuperación elástica del material, mantiene unos valores de velocidad por debajo de cero, incluso estabilizándose al final. Esto tendría sentido si el impactador atravesara el tubo, pero no es el caso.

Para obtener el valor de la velocidad, la máquina de ensayos realiza una serie de complejos cálculos a partir de los valores de aceleración medidos por el acelerómetro del impactador. Como se vio en la sección anterior (Evolución de la aceleración del impactador), la gráfica de la aceleración presenta un fuerte ruido, especialmente en el área cercana al momento del impacto. Estos errores se pueden arrastrar al realizar dichos cálculos, lo que explicaría las incongruencias mencionadas anteriormente.



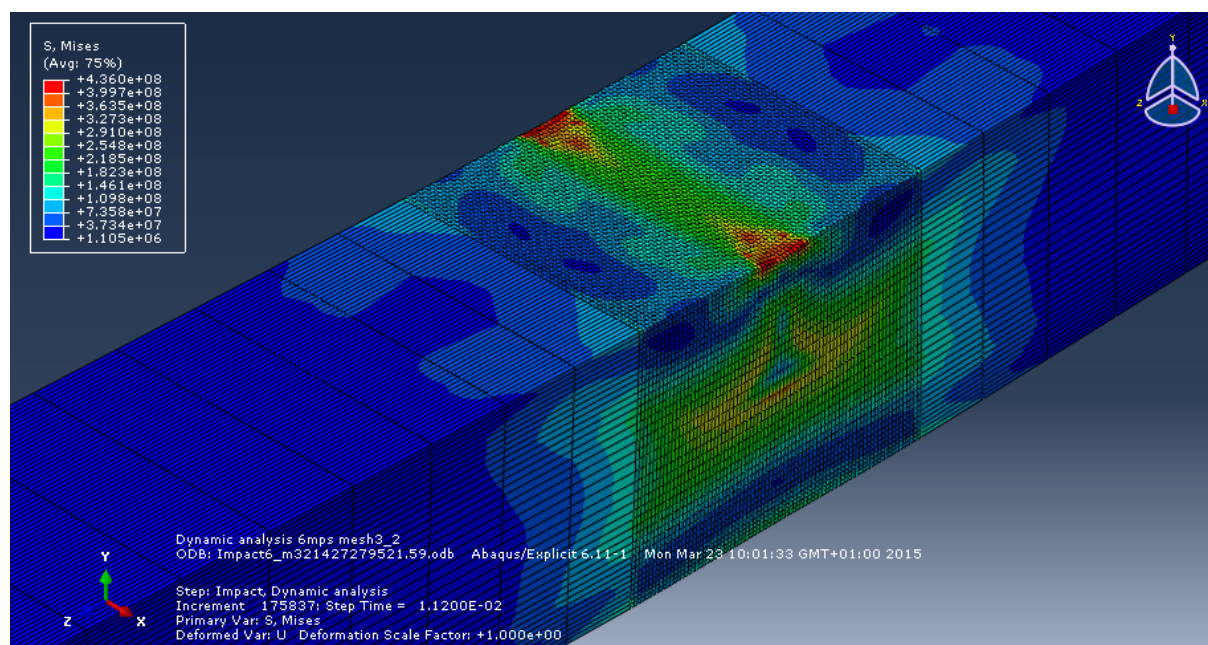
(a) $V_0 = 6m/s$



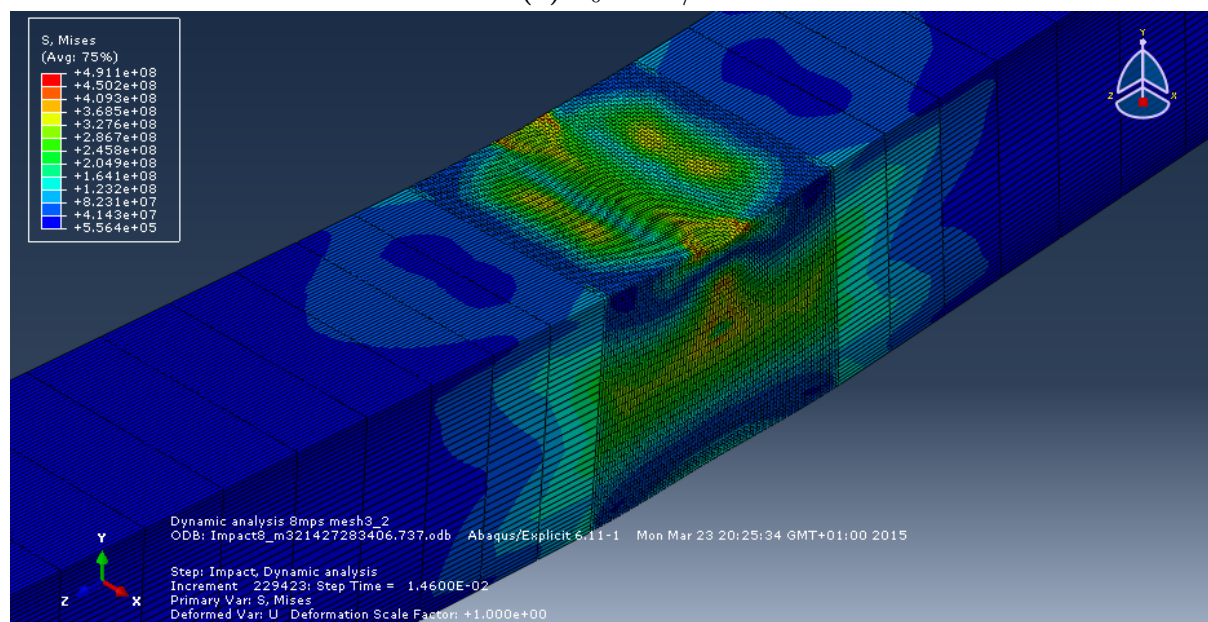
(b) $V_0 = 8m/s$

Figura 7.2: Evolución de la velocidad del impactador durante el ensayo de flexión dinámica en tres puntos.

7.3.1. Tensión



(a) $V_0 = 6m/s$

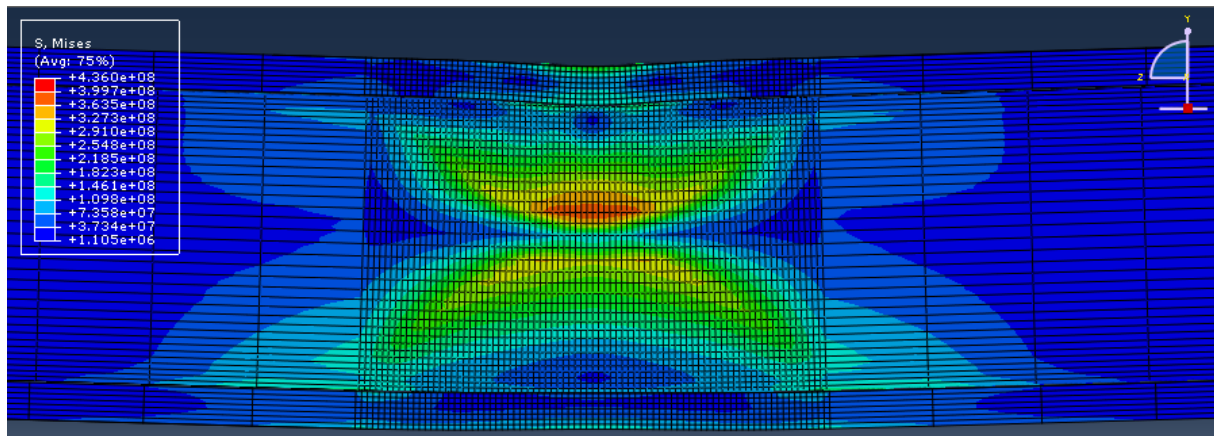


(b) $V_0 = 8m/s$

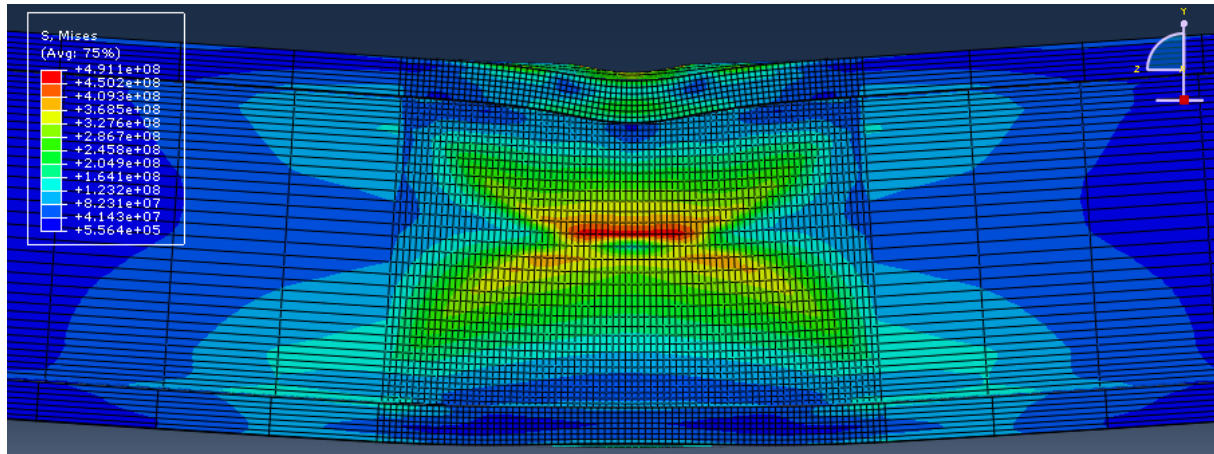
Figura 7.3: Tensiones de Von Mises: vista general

Los puntos sometidos a una mayor tensión son los que se encuentran en el centro del tubo, justo donde éste entra en contacto con el impactador.

En la figura 7.3 se muestra el contorno de tensiones de Von Mises para los dos casos estudiados. Para apreciar mejor dichas tensiones, se ha realizado un corte transversal y otro longitudinal en los casos estudiados, ambos mostrados en las figuras 7.4 y 7.5, respectivamente. Además, en las figuras 7.6 y 7.7 se muestra el contorno de tensiones de Von Mises en la cara superior e inferior del tubo, respectivamente.



(a) $V_0 = 6 \text{ m/s}$

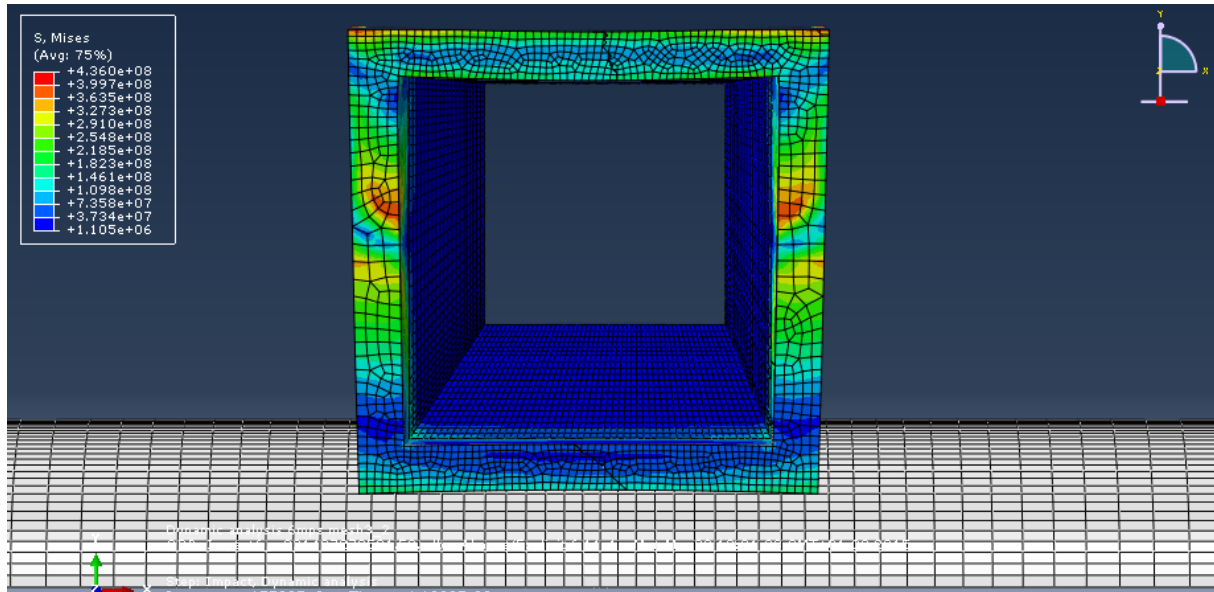


(b) $V_0 = 8 \text{ m/s}$

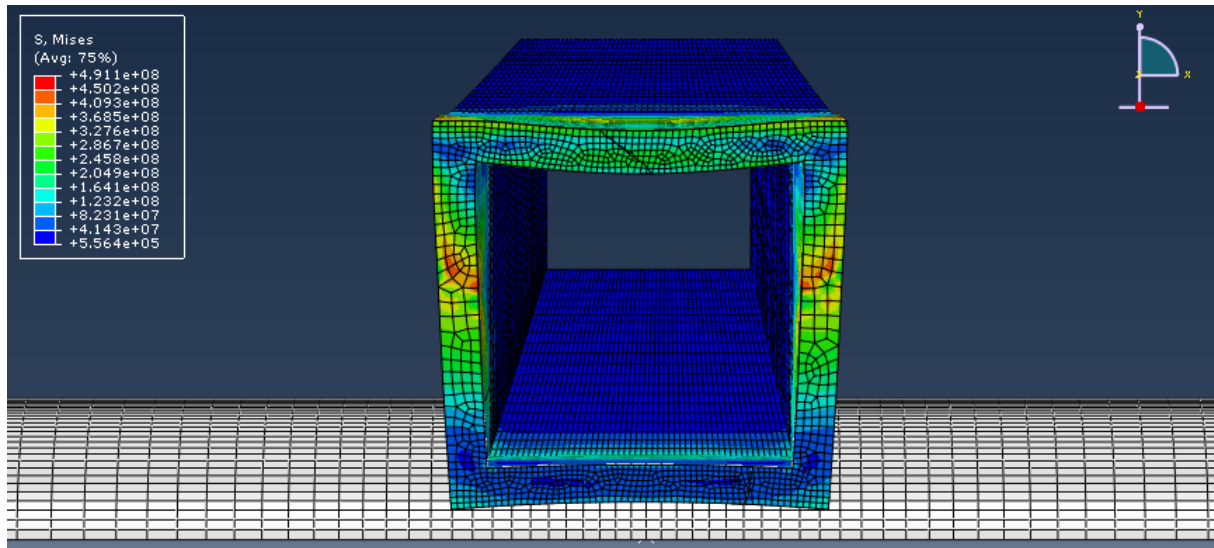
Figura 7.4: Tensiones de Von Mises: corte longitudinal

Como se aprecia en la figura 7.6, las mayores tensiones se dan en la cara superior, que es la parte donde el tubo entra en contacto con el impactador. Las caras laterales también sufren una tensión considerable (figuras 7.3, 7.4 y 7.5), lo cual se debe a que, debido al

efecto flector, se ha comenzado a formar una rótula plástica en el centro del tubo (ver figura 2.9).

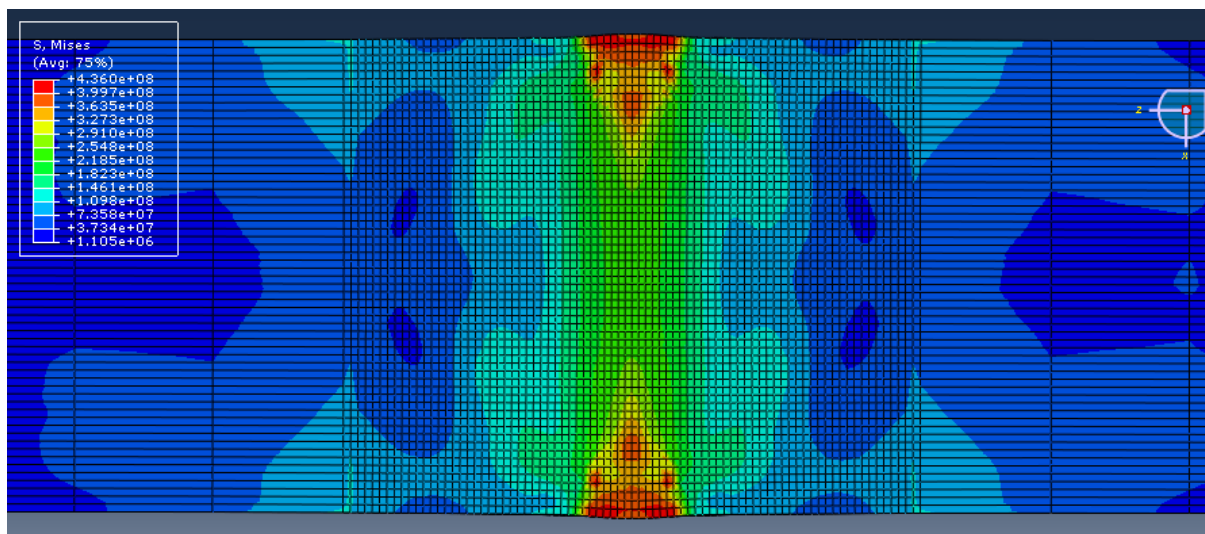


(a) $V_0 = 6m/s$

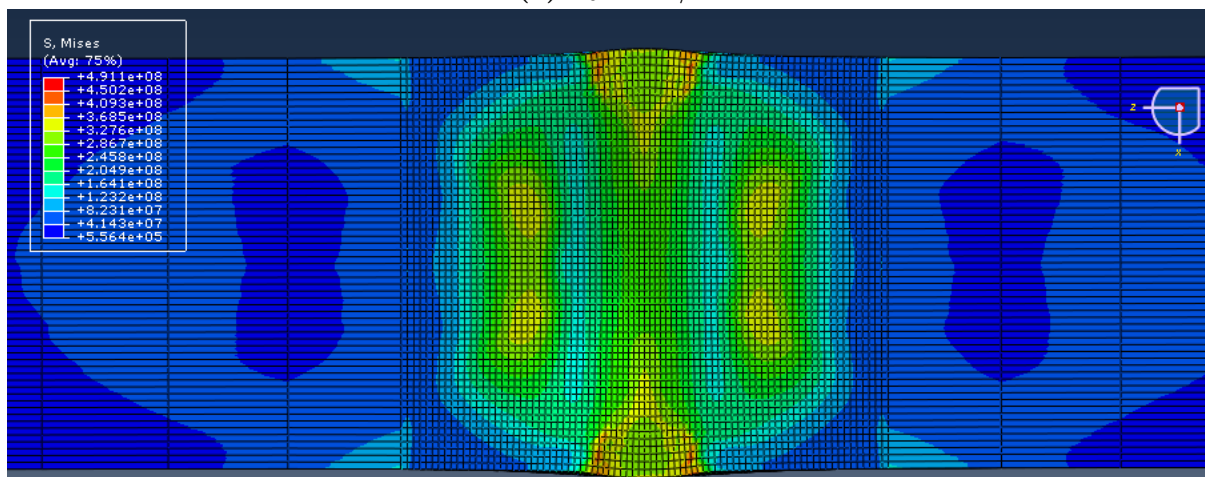


(b) $V_0 = 8m/s$

Figura 7.5: Tensiones de Von Mises: corte transversal

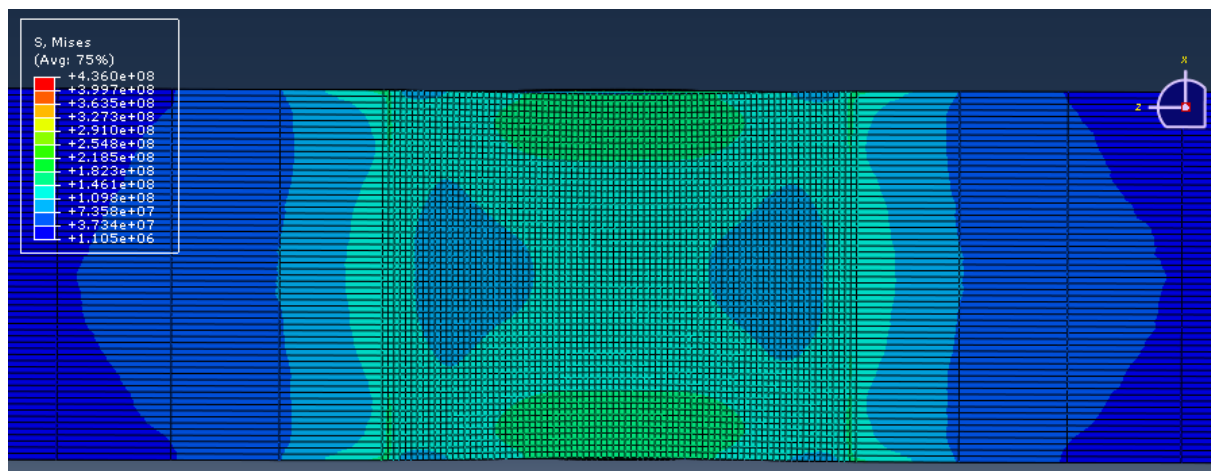


(a) $V_0 = 6m/s$

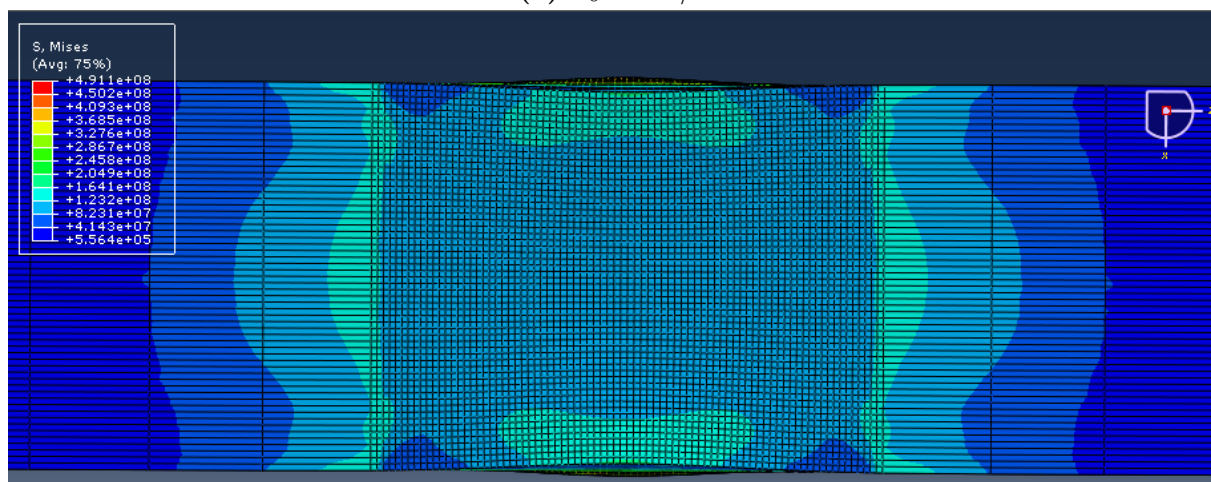


(b) $V_0 = 8m/s$

Figura 7.6: Tensiones de Von Mises: cara superior



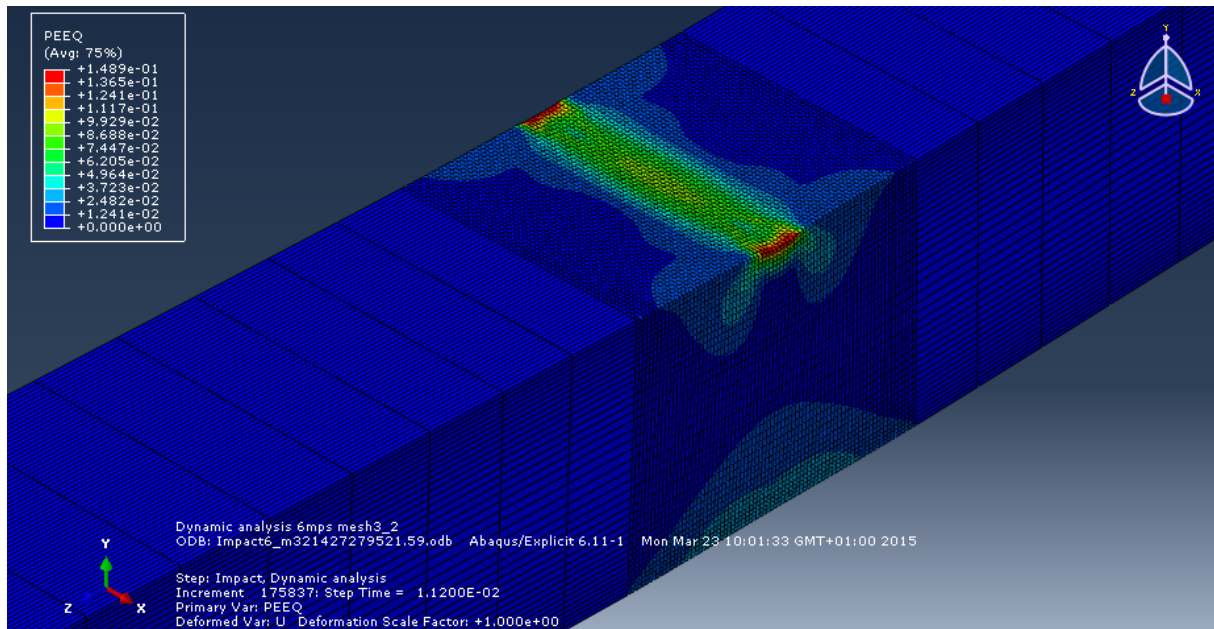
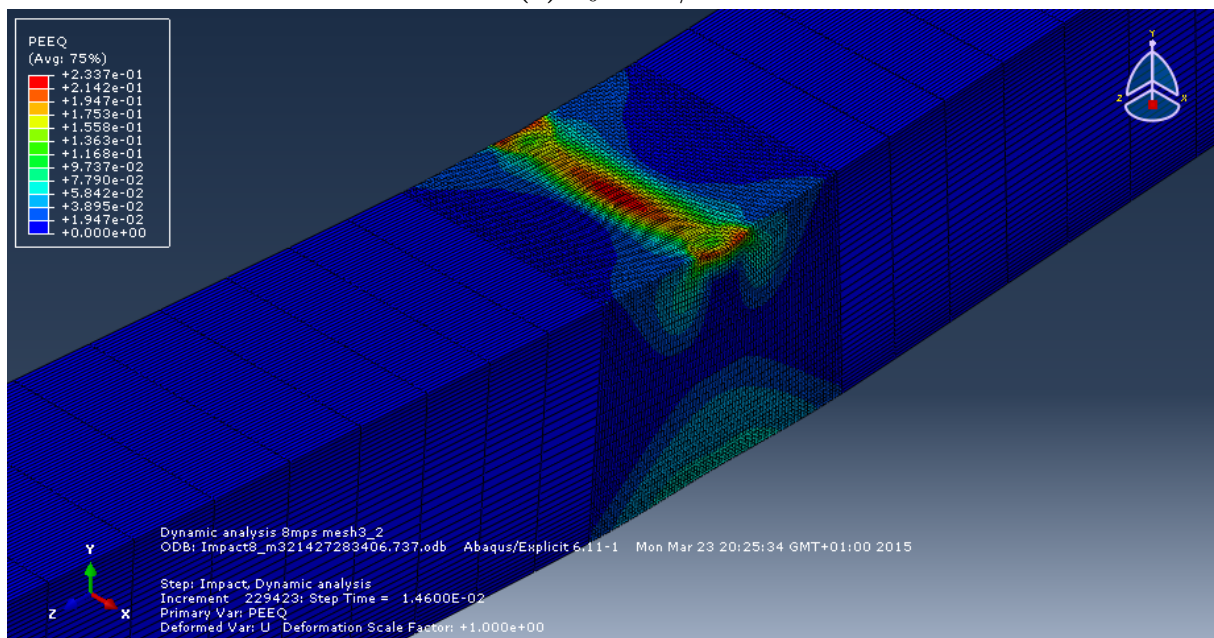
(a) $V_0 = 6 \text{ m/s}$



(b) $V_0 = 8 \text{ m/s}$

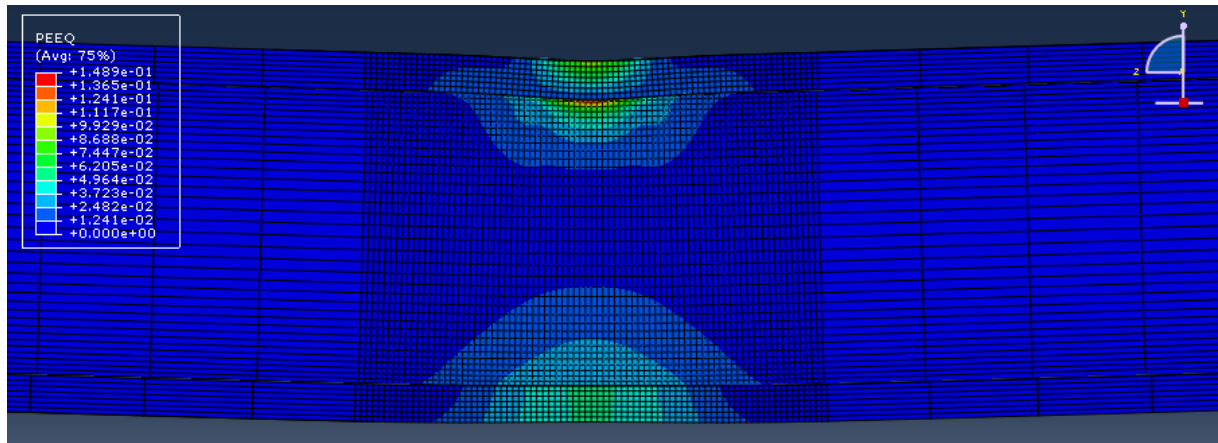
Figura 7.7: Tensiones de Von Mises: cara inferior

7.4. Deformación

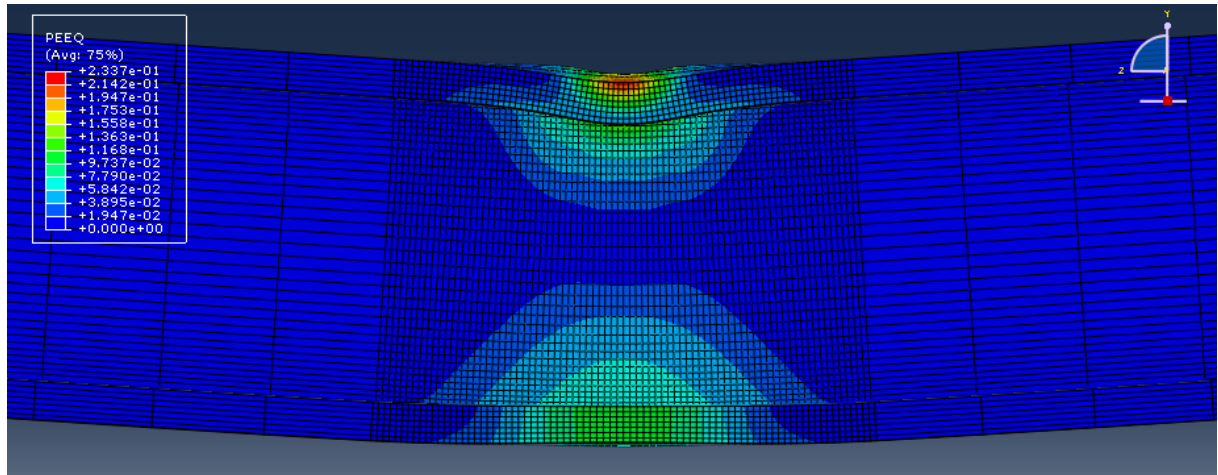
(a) $V_0 = 6m/s$ (b) $V_0 = 8m/s$ **Figura 7.8:** Deformaciones plásticas equivalentes: vista general

Dado que las deformaciones se deben al efecto de las tensiones ejercidas sobre el tubo, estas van a darse en el mismo punto que estas últimas: el centro del tubo.

En la figura 7.8 se muestra el contorno de las deformaciones plásticas equivalentes para los dos casos estudiados. Para apreciar mejor dichas deformaciones, y de forma análoga al análisis hecho en la sección anterior, se ha realizado un corte longitudinal y otro transversal en los casos estudiados, ambos mostrados en las figuras 7.9 y 7.10, respectivamente. Además, en las figuras 7.11 y 7.12 se muestra el contorno de deformaciones plásticas equivalentes en la cara superior e inferior del tubo, respectivamente.



(a) $V_0 = 6m/s$



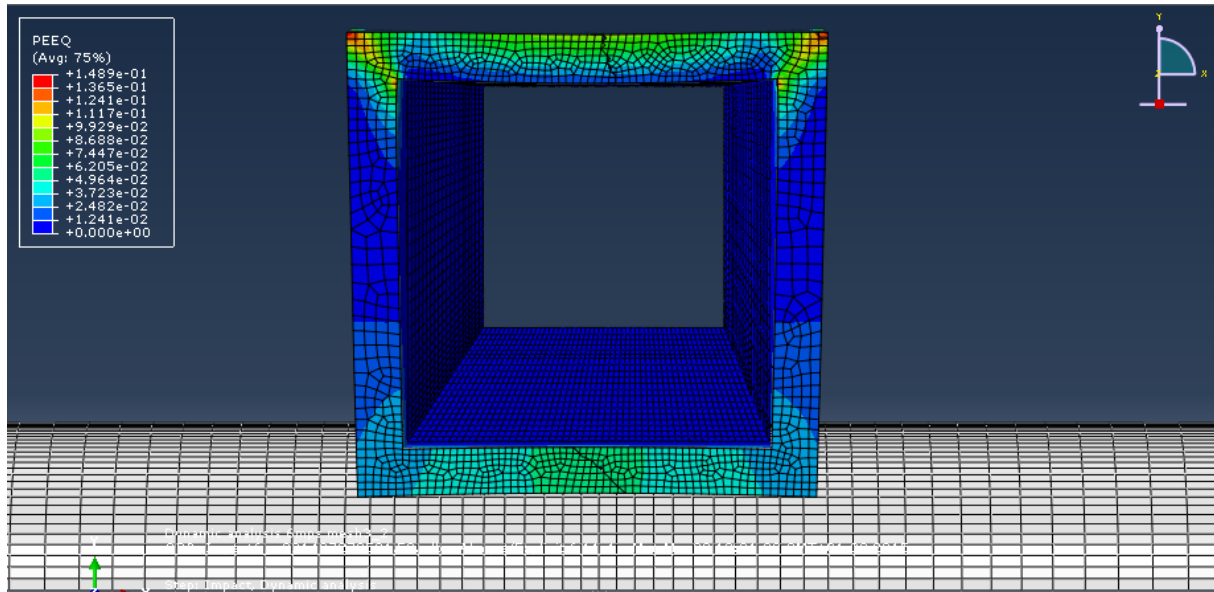
(b) $V_0 = 8m/s$

Figura 7.9: Deformaciones plásticas equivalentes: corte longitudinal

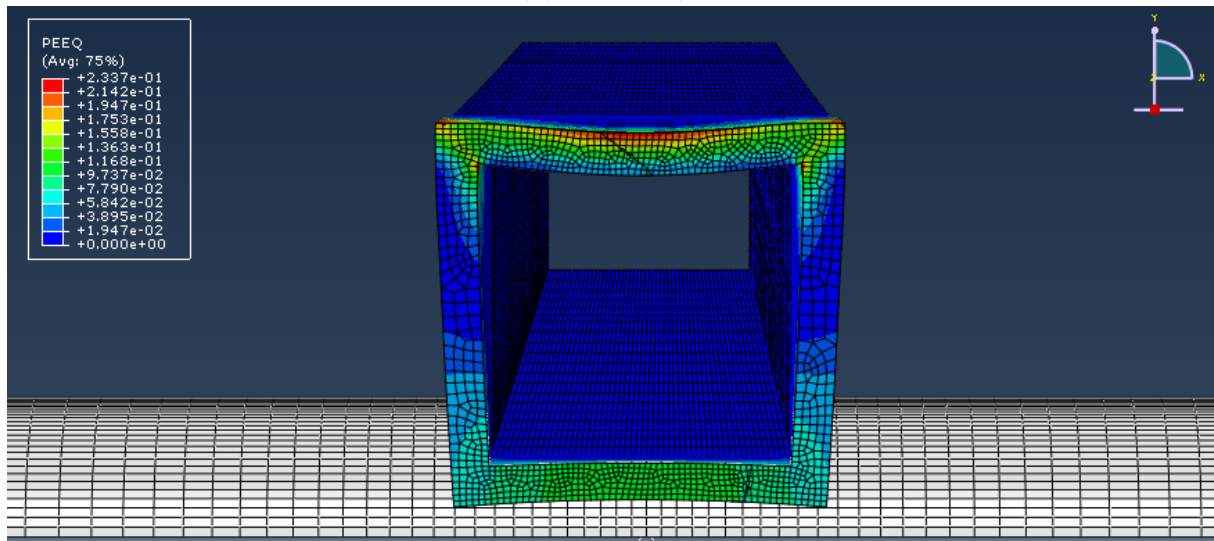
Las mayores deformaciones se dieron en la cara superior, justo donde el impactador entra en contacto con el tubo, y en la cara inferior que, debido a la flexión, se encuentra

sometida a un esfuerzo tractor. También hay una ligera deformación plástica en las caras laterales, que coincide con la formación de una rótula plástica (ver figura 2.9).

Como se puede observar en las figuras 7.13 y 7.14, la deformación sufrida por el tubo en el modelo numérico coincide con la deformación que sufrió el tubo tras el ensayo experimental.

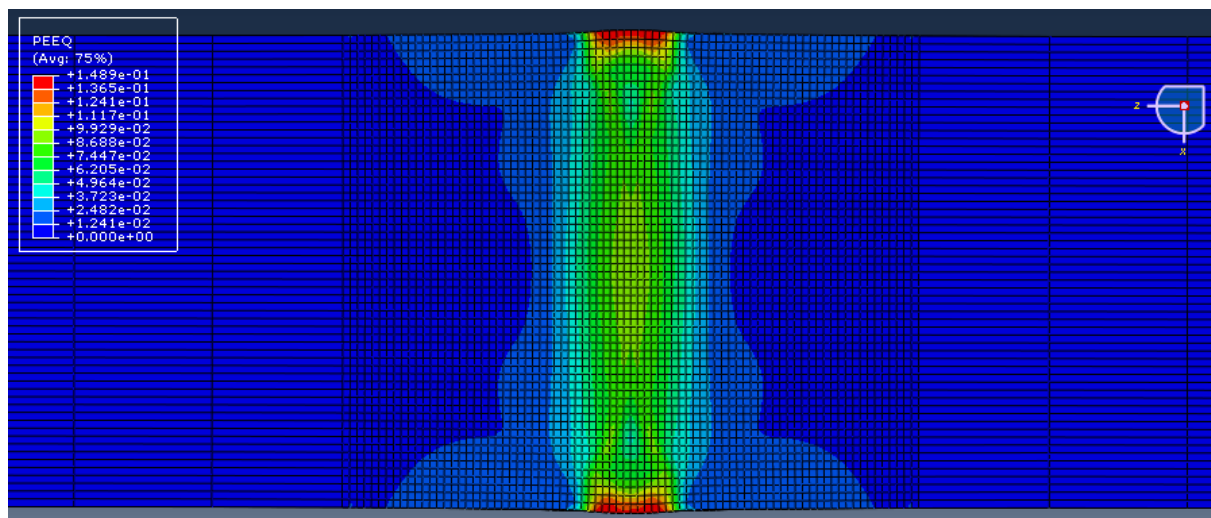


(a) $V_0 = 6\text{ m/s}$

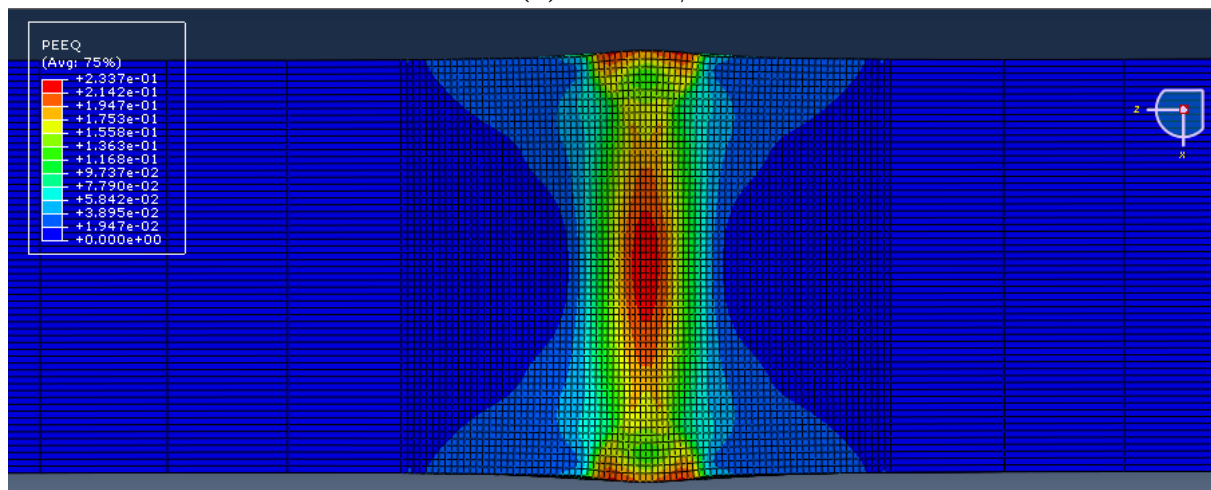


(b) $V_0 = 8\text{ m/s}$

Figura 7.10: Deformaciones plásticas equivalentes: corte transversal

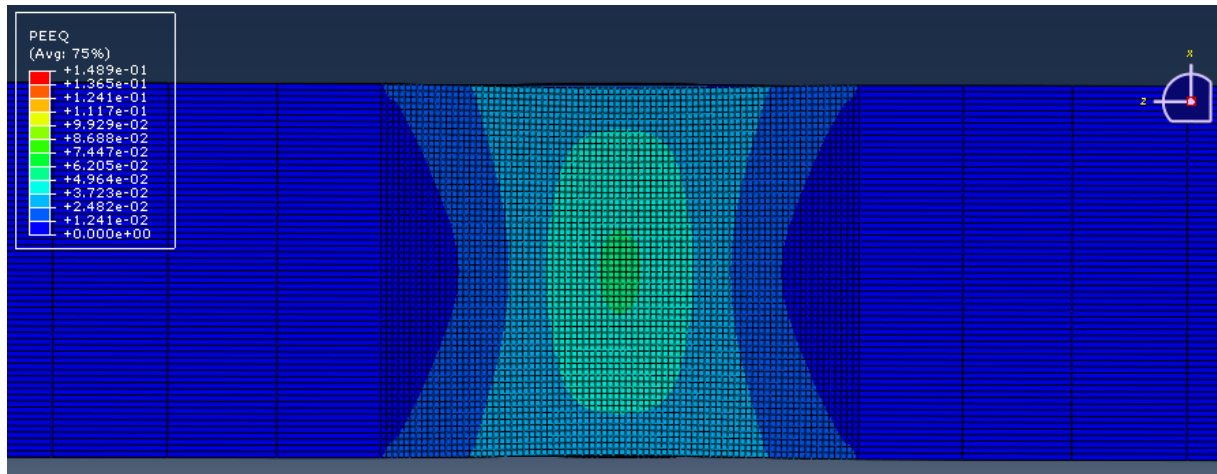


(a) $V_0 = 6m/s$

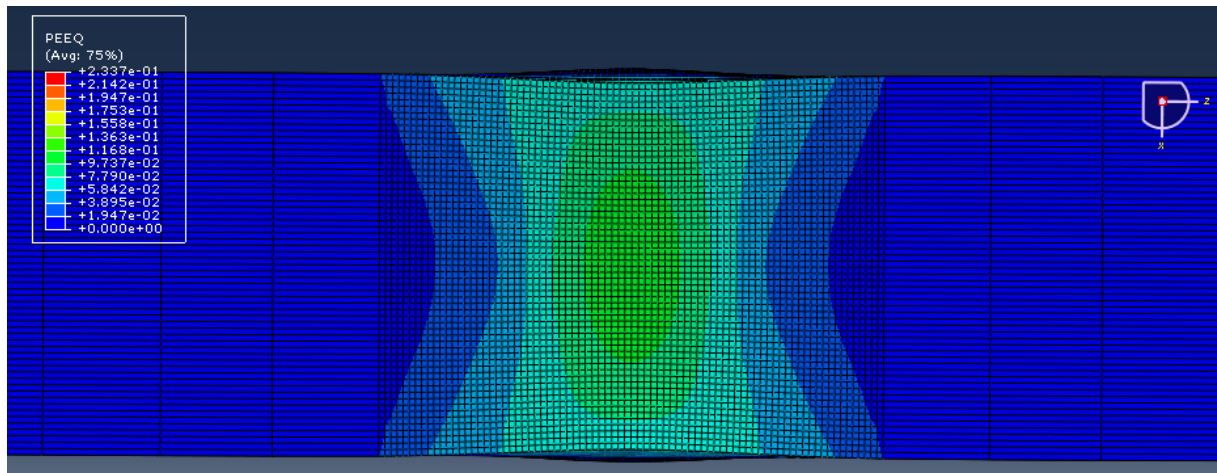


(b) $V_0 = 8m/s$

Figura 7.11: Deformaciones plásticas equivalentes: cara superior

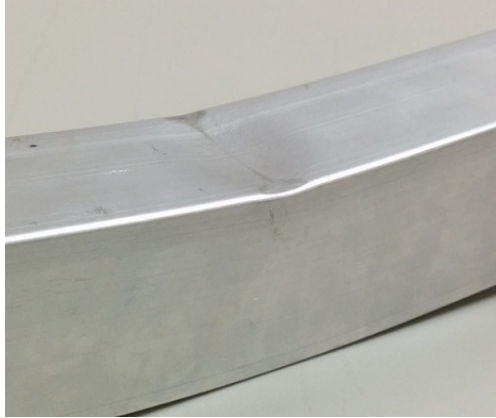


(a) $V_0 = 6m/s$

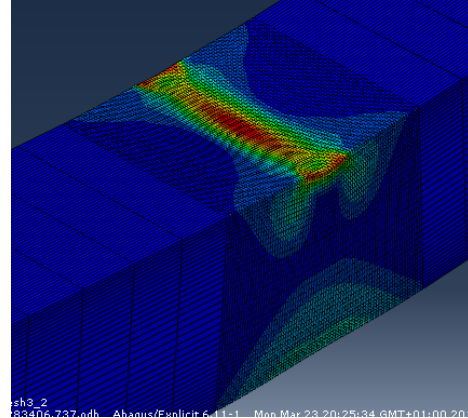


(b) $V_0 = 8m/s$

Figura 7.12: Deformaciones plásticas equivalentes: cara inferior



(a) Ensayo experimental

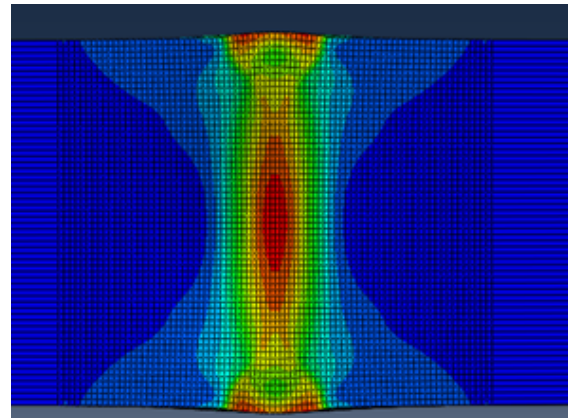


(b) Abaqus

Figura 7.13: Comparación de la deformación entre el ensayo experimental y el modelo numérico ($V_0 = 8m/s$). - Vista lateral



(a) Ensayo experimental



(b) Abaqus

Figura 7.14: Comparación de la deformación entre el ensayo experimental y el modelo numérico ($V_0 = 8m/s$). - Vista superior

7.5. Energía absorbida

En la figura 7.15 se muestra la energía cinética del impactador, calculada a partir de la ecuación 7.1, y en la figura 7.16 se muestra la energía cinética obtenida usando ABAQUS.

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot M_p \cdot v^2 \quad (7.1)$$

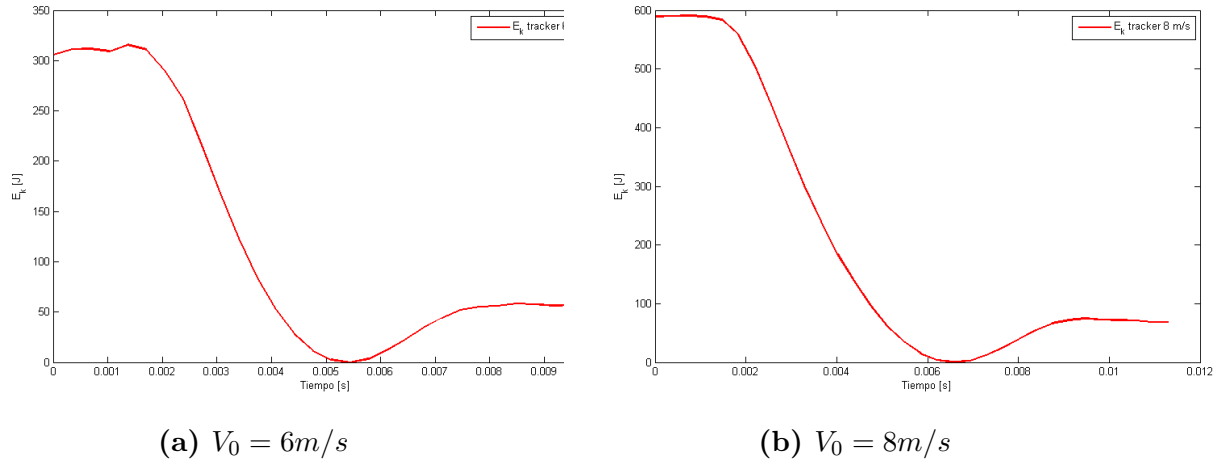


Figura 7.15: Energía cinética obtenida a través del análisis de vídeo.

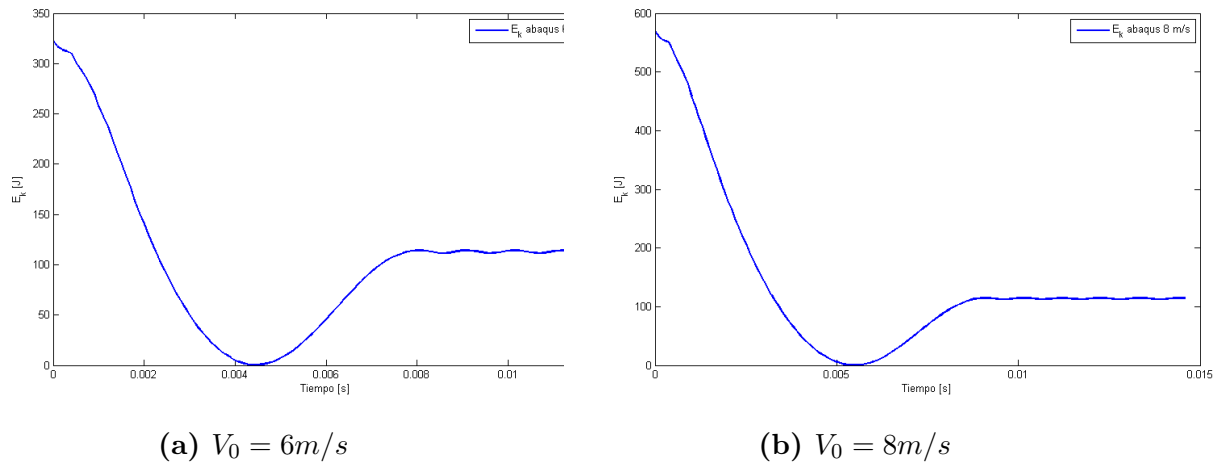


Figura 7.16: Energía cinética obtenida a través del modelo numérico.

Para calcular la energía absorbida por el impactador basta con hacer un balance de energía cinética, ya que la energía cinética perdida se ha transformado en energía de deformación plástica. En la tabla 7.1 se pueden ver los valores de energía absorbida.

	Traker 6m/s	Abaqus 6m/s	Tracker 8m/s	Abaqus 8m/s
Energía absorbida [J]	288.6	208.1	515.66	456.8

Tabla 7.1: Energía absorbida por el material.

Como puede apreciarse, la energía absorbida por el modelo numérico es menor que la energía absorbida calculada a partir del análisis de vídeo. Esto puede ser debido a que el ABAQUS calcula la energía cinética para todo el conjunto de elementos, mientras que en el caso del análisis de vídeo sólo se ha tenido en cuenta la velocidad del impactador.

Cuando el tubo se deforma, una parte de esa deformación es en régimen elástico. Esta deformación no es permanente, por lo que en cuanto el impactador se separa se producirá una recuperación elástica que hará que el tubo gane una ligera velocidad, velocidad que ABAQUS tiene en cuenta al mostrar los valores de energía cinética.

7.6. Desplazamiento

En la figura 7.17 se muestran el contorno de los desplazamientos que se dan en el modelo numérico en el que el impactador se lanza con una velocidad de 8 m/s .

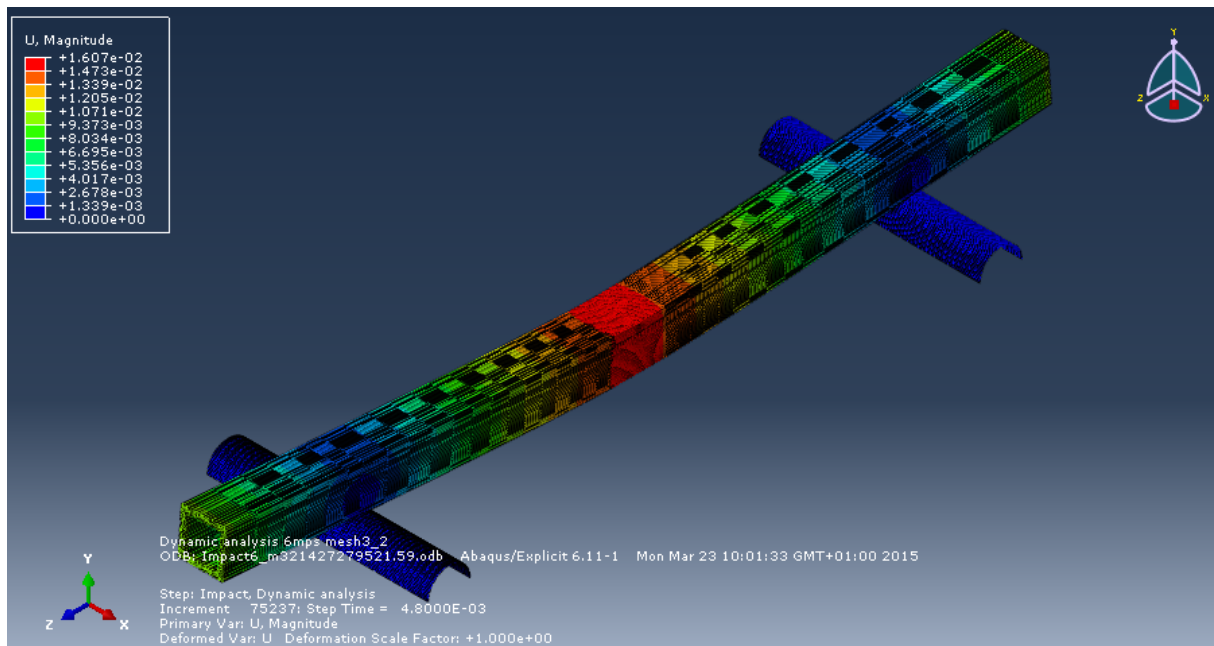
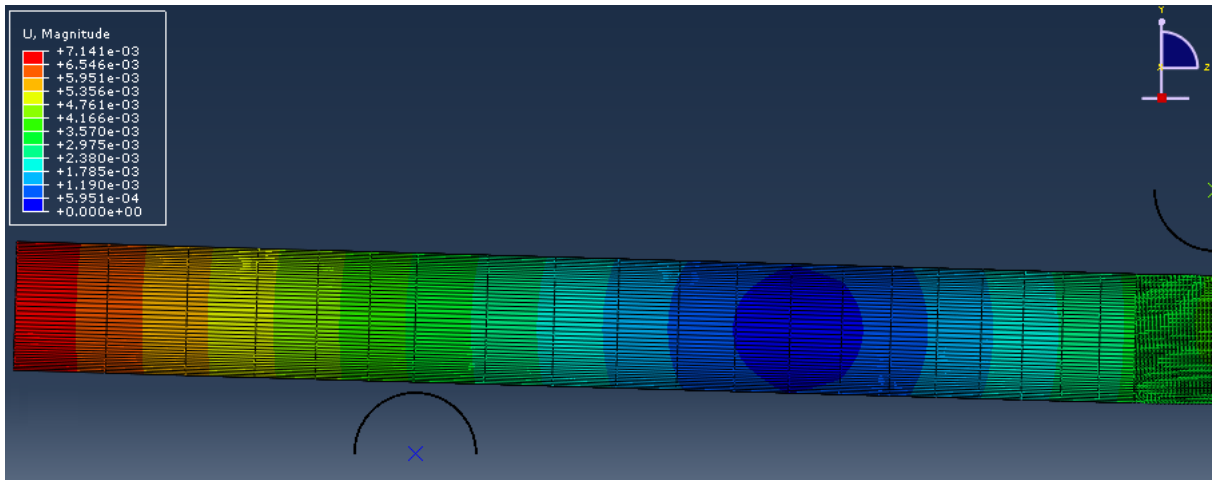
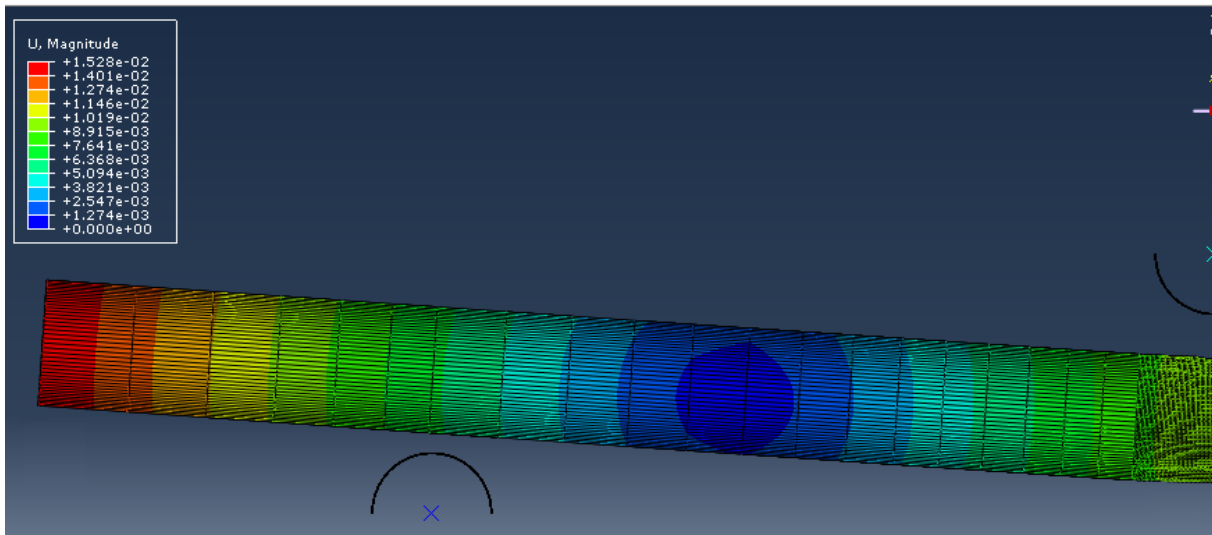


Figura 7.17: Contorno de desplazamientos en el caso $V_0 = 8m/s$.

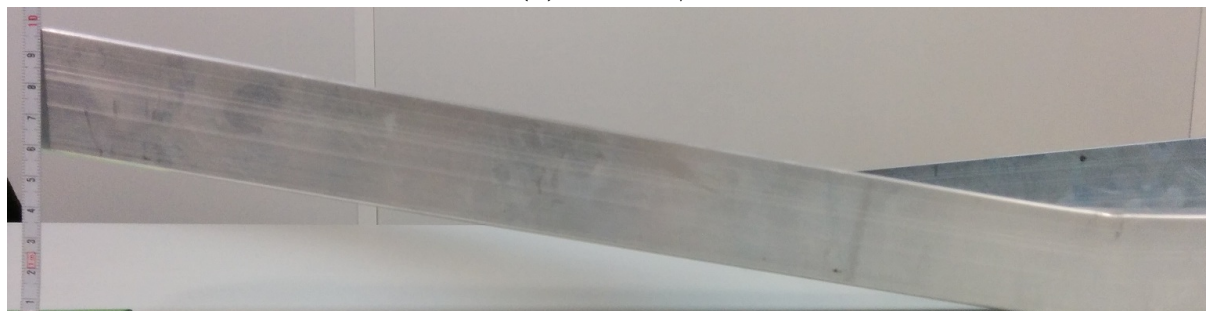
Para calcular la flecha se ha hallado la diferencia entre los desplazamientos relativos de los nodos que se encuentran en la mitad del tubo, y los tubos que se encuentran en el extremo (ver figura 7.18).

(a) $V_0 = 6m/s$ (b) $V_0 = 8m/s$ **Figura 7.18:** Detalle del contorno de los desplazamientos.

Estos valores se han comparado con los datos medidos directamente en los tubos (ver figura 7.19). Para tomar esta medida, los tubos se apoyaron sobre una de las caras inferiores, de manera que uno de los extremos quedara pegado a la superficie y el otro lo más alejado posible. La mitad de la diferencia de altura entre los extremos será igual a la flecha (ver figura 7.20).

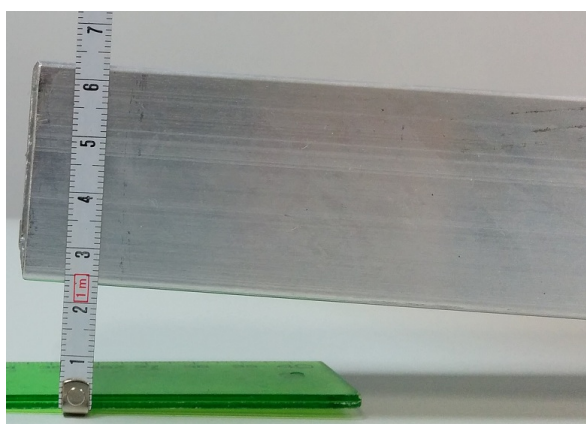


(a) $V_0 = 6\text{ m/s}$

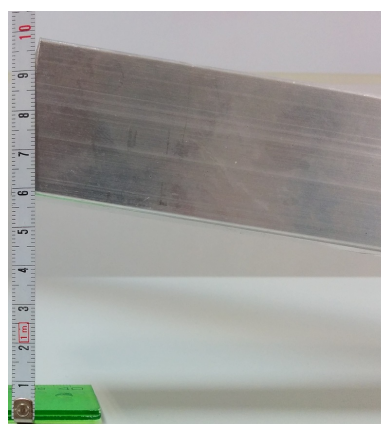


(b) $V_0 = 8\text{ m/s}$

Figura 7.19: Medición de la flecha de desplazamiento.



(a) Ensayo experimental



(b) Abaqus

Figura 7.20: Detalle de las mediciones de los tubos.

En la tabla 7.2 se muestran los valores medidos

.	Abaqus 6m/s	Ensayo 6m/s	Abaqus 8m/s	Ensayo 8m/s
Desplazamiento [cm]	0.35	1.675	2.5	2.95

Tabla 7.2: Energía absorbida por el material.

Como puede verse, en el caso de los tubos sometidos a un impacto con una velocidad inicial de 8 m/s, la diferencia es relativamente pequeña y puede ser atribuida a pequeños errores de precisión. En cambio, en el caso para $V_0 = 6\text{ m/s}$ hay una diferencia bastante mayor. Esto puede ser debido a errores durante el ensayo experimental a la hora de centrar el tubo sobre los apoyos, lo que conllevaría a desplazamiento de la rótula plástica hacia uno de los extremos, haciendo la medición mucho más compleja e imprecisa.

Los resultados obtenidos tanto experimental como numéricamente se pueden resumir en los siguientes puntos

- Aunque siempre se debe esperar un cierto nivel de ruido en los datos registrados en una máquina de ensayos, los datos obtenidos en los ensayos experimentales realizados distan mucho de ser óptimos. El hecho de que el ensayo experimental realizado a una velocidad inicial de 6 m/s diera resultados muchos más coherentes que el realizado a 8 m/s reafirma la idea de que los límites de servicio de la máquina están mal establecidos. Aunque en el manual se indique que se pueden realizar hasta a una velocidad inicial de 8 m/s, los resultados muestran que no es así. Es importante destacar que sería necesario realizar más ensayos para conocer con certeza el comportamiento del dispositivo en este tipo de ensayos. Sin embargo, no fue posible, por causas ajenas al autor de este documento, repetir el ensayo a la misma velocidad para comprobar estas afirmaciones.
- Las herramientas de análisis de vídeo han demostrado su potencial de cálculo al ser capaces de dar resultados coherentes que han permitido tener una base experimental para llevar a cabo el estudio del comportamiento del tubo durante un ensayo dinámico de flexión en tres puntos.
- Las deformaciones y tensiones calculadas muestran gran similitud con los resultados experimentales. El modelo numérico ha permitido calcular un balance de energías con el que se han conseguido resultados aproximados a los obtenidos de forma experimental, entre ellos la cantidad de energía cinética que ha sido absorbida por el material del tubo en forma de deformación plástica.

En este capítulo se enuncian algunas líneas de trabajo futuras en base a los resultados experimentales y numéricos obtenidos:

- Realización de ensayos experimentales utilizando el Lanzador Neumático de Formas de la universidad, con unos valores de velocidad menores para así comprobar el impacto que tiene la velocidad inicial del lanzador en la precisión de los resultados obtenidos.
- Estudiar la posibilidad de redefinir el mallado lo suficiente para que el coste computacional sea lo suficientemente bajo para poder realizar estudios paramétricos sirviéndose del modelo numérico.
- Realización de un estudio analítico que corrobore los datos calculados en los ensayos experimentales y numéricos.

Página en blanco intencionadamente

Bibliografía

- W Abramowicz and N Jones. Transition from initial global bending to progressive buckling of tubes loaded statically and dynamically. *International Journal of Impact Engineering*, 19(5):415–437, 1997.
- S.T.S. Al-Hassani, W. Johnson, and W.T. Lowe. Characteristics of inversion tubes under axial loading. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 14(6):370–381, 1972.
- J.M. Alexander. An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading. *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 13(1): 10–15, 1960.
- A.A.A. Alghamdi. Collapsible impact energy absorbers: an overview. *Thin-walled structures*, 39(2):189–213, 2001.
- AG Atkins. Scaling in combined plastic flow and fracture. *International Journal of Mechanical Sciences*, 30(3):173–191, 1988.
- Francois Barthelat and Hubert Lobo. High velocity 3 point bending test using an impact tower. Datapoint Testing Services, Ithaca NY <http://www.testpaks.com/3POINTBENDING.htm> Fecha de acceso: 16 de Marzo de 2015.
- JF Carney and S Pothen. Energy dissipation in braced cylindrical shells. *International Journal of Mechanical Sciences*, 30(3):203–216, 1988.
- Luisa Fernanda Castro Patiño. Aleaciones de aluminio y su importancia en la industria aeroespacial. *Metal Actual*, 31:12–20, 2014.

- Vlad Andrei Ciubotariu. Crashworthiness improvement of different tubular structures using tailor welded blanks. *Advanced Science Letters*, 19:578–582, 2013. ISSN 19366612. doi: 1166/asl.2013.4754.
- V. Crupi and R. Montanini. Aluminium foam sandwiches collapse modes under static and dynamic three-point bending. *International Journal of Impact Engineering*, 34(3): 509–521, 2007.
- Davies G.A.O. and Morton J. Structural impact and crashworthiness. Technical report, 1978.
- Lanhui Guo, Sumei Zhang, Wha-Jung Kim, and Gianluca Ranzi. Behavior of square hollow steel tubes and steel tubes filled with concrete. *Thin-Walled Structures*, 45(12): 961–973, 2007.
- Liuwei Guo and Jilin Yu. Dynamic bending response of double cylindrical tubes filled with aluminum foam. *International journal of impact engineering*, 38(2):85–94, 2011.
- LW Guo, JL Yu, and ZB Li. Experimental studies on the quasi-static bending behavior of double square tubes filled with aluminum foam. *Acta mechanica*, 213(3-4):349–358, 2010.
- AG Hanssen, OS Hopperstad, and M Langseth. Bending of square aluminium extrusions with aluminium foam filler. *Acta Mechanica*, 142(1-4):13–31, 2000.
- H Hooputra, H Gese, H Dell, and H Werner. A comprehensive failure model for crashworthiness simulation of aluminium extrusions. *International Journal of Crashworthiness*, 9(5):449–464, 2004.
- Chun Hou. *Numerical and Experimental Crashworthiness Studies of Foam-filled Frusta*. PhD thesis, 2013.
- SPFC Jaspers and JH Dautzenberg. Material behaviour in conditions similar to metal cutting: flow stress in the primary shear zone. *Journal of Materials Processing Technology*, 122(2):322–330, 2002.
- Gordon R Johnson and William H Cook. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. In *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*, volume 21, pages 541–547. The Netherlands, 1983.
- W Johnson, SR Reid, and T Yella Reddy. The compression of crossed layers of thin tubes. *International Journal of Mechanical Sciences*, 19(7):423–437, 1977.

-
- William Johnson and Athanasios G. Mamalis. Crashworthiness of vehicles. Technical report, 1978.
- Norman Jones. *Structural impact*. Cambridge university press, 1989.
- Norman Jones and Tomasz Wierzbicki. Structural crashworthiness. Technical report, 1983.
- Norman Jones and Tomasz Wierzbicki. *Structural Crashworthiness and Failure: Proceedings of the Third International Symposium on Structural Crashworthiness held at the University of Liverpool, England, 14-16 April 1993*. CRC Press, 2010.
- Ingo Kallina, F Zeidler, KH Baumann, and D Scheunert. The offset crash against a deformable barrier, a more realistic frontal impact. In *Proceedings: International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, volume 1995, pages 1300–1304. National Highway Traffic Safety Administration, 1995.
- Dušan Kecman. Bending collapse of rectangular and square section tubes. *International Journal of Mechanical Sciences*, 25(9):623–636, 1983.
- TH Kim and SR Reid. Bending collapse of thin-walled rectangular section columns. *Computers & Structures*, 79(20):1897–1911, 2001.
- M Langseth, OS Hopperstad, and AG Hanssen. Crash behaviour of thin-walled aluminium members. *Thin-walled structures*, 32(1):127–150, 1998.
- M Langseth, OS Hopperstad, and T Berstad. Crashworthiness of aluminium extrusions: validation of numerical simulation, effect of mass ratio and impact velocity. *International Journal of Impact Engineering*, 22(9):829–854, 1999.
- Meng Li, Zongquan Deng, Hongwei Guo, Rongqiang Liu, and Beichen Ding. Crashworthiness analysis on alternative square honeycomb structure under axial loading. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 26(4):784–792, 2013.
- Reza Mehryari Lima, ZN Ismarrubie, ES Zainudin, and SH Tang. Axial behavior of steel tube wrapped by composite as energy absorber under compressive load. In *Business, Engineering and Industrial Applications (ISBEIA), 2011 IEEE Symposium on*, pages 10–15. IEEE, 2011.
- Yucheng Liu. Crashworthiness design of multi-corner thin-walled columns. *Thin-Walled Structures*, 46(12):1329–1337, 2008.
- G Lu, LS Ong, B Wang, and HW Ng. An experimental study on tearing energy in splitting square metal tubes. *International journal of mechanical sciences*, 36(12):1087–1097, 1994.

- AG Mamalis and W Johnson. The quasi-static crumpling of thin-walled circular cylinders and frusta under axial compression. *International Journal of Mechanical Sciences*, 25(9):713–732, 1983.
- AG Mamalis, W Johnson, and GL Viegelaahn. The crumpling of steel thin-walled tubes and frusta under axial compression at elevated strain-rates: some experimental results. *International journal of mechanical sciences*, 26(11):537–547, 1984.
- G Mrówka-Nowotnik, J Sieniawski, and A Nowotnik. Tensile properties and fracture toughness of heat treated 6082 alloy. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 17(1-2):1–2, 2006.
- Carmine Nappi. The global aluminium industry 40 years from 1972. *International Aluminium Institute*, Febrero 2013.
- Johnny F. Obando and Esteban Sánchez. Tratamientos térmicos para aluminios. *Metal Actual*, 31:36–43, 2014.
- A Page, R Moreno, P Candelas, and F Belmar. The accuracy of webcams in 2d motion analysis: sources of error and their control. *European Journal of Physics*, 29(4):857, 2008.
- Héctor López Paredes. *Detección y seguimiento de objetos con cámaras en movimiento*. PhD thesis, Proyecto de fin de carrera, UAM, 2011.
- J. Paz, J. Díaz, L. Romera, and M. Costas. Crushing analysis and multi-objective crashworthiness optimization of gfrp honeycomb-filled energy absorption devices. *Finite Elements in Analysis and Design*, 91:30–39, 2014.
- Ian Polmear. *Light alloys: from traditional alloys to nanocrystals*. Butterworth-Heinemann, 2005.
- A. Pugsley and M. Macaulay. The large-scale crumpling of thin cylindrical columns. *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 13(1):1–9, 1960.
- J.S. Qiao, J.H. Chen, and H.Y. Che. Crashworthiness assessment of square aluminum extrusions considering the damage evolution. *Thin-walled structures*, 44(6):692–700, 2006.
- T Yella Reddy and SR Reid. Lateral compression of tubes and tube-systems with side constraints. *International Journal of Mechanical Sciences*, 21(3):187–199, 1979.
- TY Reddy and SR Reid. Axial splitting of circular metal tubes. *International journal of mechanical sciences*, 28(2):111–131, 1986.

-
- SR Reid, SLK Drew, and JF Carney. Energy absorbing capacities of braced metal tubes. *International Journal of Mechanical Sciences*, 25(9):649–667, 1983.
- Stephen Robert Reid. *Metal forming and impact mechanics*. 1985.
- J. Rhodes and J.M. Harvey. Design of thin walled beams. *Inst Mech Engineers Proc, London/UK/*, 1971.
- Abduljalil Abdulla Singace and Hobab El-Sobky. Behaviour of axially crushed corrugated tubes. *International Journal of Mechanical Sciences*, 39(3):249–268, 1997.
- C Sirisathitkul, P Glawtanong, T Eadkong, and Y Sirisathitkul. Digital video analysis of falling objects in air and liquid using tracker. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 35(1):1–6, 2013.
- Reid S.R., Austin C.D., and Smith R. Tubular rings as impact energy absorber. *Structural impact and crashworthiness.*, 1984.
- WJ Stronge, TX Yu, and W Johnson. Long stroke energy dissipation in splitting tubes. *International Journal of Mechanical Sciences*, 25(9):637–647, 1983.
- Hiroto Tanabe, Akihiro Miyasaka, K Yamazaki, T Iwasaki, and H Akada. High-strength steel tubes for automobile door impact beams. *Nippon Steel Technical Report*, 64:55–61, 1995.
- F. Tarlochan. Understanding the failure mechanism of composite sandwich structure for crashworthiness application.
- PH Thornton. The collapse of square section tubes in bending. *Metallurgical Transactions A*, 10(10):1533–1541, 1979.
- Tomasz Wierzbicki. Crushing analysis of metal honeycombs. *International Journal of Impact Engineering*, 1(2):157–174, 1983.
- F Smith William. Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. *Editorial McGraw-Hill*, 1998.
- Lan Wu and John F Carney. Initial collapse of braced elliptical tubes under lateral compression. *International journal of mechanical sciences*, 39(9):1023–1036, 1997.
- Lan Wu and John F Carney. Experimental analyses of collapse behaviors of braced elliptical tubes under lateral compression. *International journal of mechanical sciences*, 40(8):761–777, 1998.

- Hanfeng Yin, Guilin Wen, and Nianfei Gan. Crashworthiness design for honeycomb structures under axial dynamic loading. *International Journal of Computational Methods*, 8(04):863–877, 2011.
- Jilin Yu, Erheng Wang, Jianrong Li, and Zhijun Zheng. Static and low-velocity impact behavior of sandwich beams with closed-cell aluminum-foam core in three-point bending. *International Journal of Impact Engineering*, 35(8):885–894, 2008.
- Yunjiao Zhou, Fengchong Lan, and Jiqing Chen. Crashworthiness research on s-shaped front rails made of steel–aluminum hybrid materials. *Thin-Walled Structures*, 49(2):291–297, 2011.